E. F. ALBOIU M. DEGERATU N. I. ALBOIU

STUDII DE INGINERIE HIPERBARĂ PENTRU SCUFUNDĂRI PROFESIONALE



MATRIX ROM BUCUREȘTI

E. F. ALBOIU - M. DEGERATU - N.I. ALBOIU • STUDII DE INGINERIE HIPERBARĂ PENTRU SCUFUNDĂRI PROFESIONALE



E. F. ALBOIU   M. DEGERATU   N. I. ALBOIU

STUDII DE INGINERIE HIPERBARĂ PENTRU SCUFUNDĂRI PROFESIONALE

MATRIX ROM
Bucureşti 2021

C.P. 16-162
062510 – Bucureşti
tel. 021.4113617, 031.4012438, 0372743840
fax 021.4114280
e-mail: office@matrixrom.ro
www.matrixrom.ro

Editura MATRIX ROM este acreditată de
CONSILIUL NAŢIONAL AL CERCETĂRII ŞTIINŢIFICE DIN ÎNVĂŢĂMÂNTUL SUPERIOR

Referenți ştiinţifici:
CS II, dr. ing. Simona Elena RUS
Centrul de Scafandri Constanţa,
Forțele Navale Române
Comandor, CS III, drd. ing. Mihai DIACONU
Centrul de Scafandri Constanța,
Forțele Navale Române

Coperta I: Fotografie din Laboratorul Hiperbar, Centrul de Scafandri Constanţa

Descrierea CIP a Bibliotecii Naţionale a României
ALBOIU, ELENA FELICIA
Studii de inginerie hiperbară pentru scufundări profesionale / Elena Felicia Alboiu, Mircea Degeratu, Nicolae Ioan Alboiu - Bucureşti, Matrix Rom, 2021
Conține bibliografie
ISBN 978-606-25-0667-4

I. Degeratu, Mircea
II. Alboiu, Nicolae Ioan

626

ISBN 978-606-25-0667-4

PREFAȚĂ

Domeniul scufundărilor profesionale prezintă interes atât din punct de vedere economic, industrial, mai ales domeniul scufundărilor de mare adâncime, cât și din punct de vedere militar datorită faptului că, în cazul unor confruntări armate, mediul acvatic se poate transforma în teatru de operațiuni militare submarine. În desfășurarea activităților subacvatice industriale și militare, un rol important îl reprezintă stăpânirea tehnologiilor hiperbare și utilizarea instalațiilor și echipamentelor subacvatice.

Prezenta carte are un caracter complex, îmbinând latura teoretică a problematicii abordate cu cercetarea experimentală. În capitolele lucrării, alternează secțiunile cu prezentarea noțiunilor teoretice cu secțiunile în care sunt prezentate contribuțiile în domeniu aduse de către lucrare, materializate prin modele analitice de calcul pentru scufundările de mare adâncime, unitare, de sistem și procedee de calcul, pe baza cărora a fost dimensionată o instalație originală de preparare a amestecurilor respiratorii, executată și testată ulterior în Laboratorul Hiperbar al Centrului de Scafandri din Constanța, din cadrul Forțelor Navale Române.

Cartea este organizată pe 8 capitole dintre care cele mai importante sunt:

- capitolele în care se prezintă modelele matematice, analitice, concepute cu scopul de a descrie, printr-o serie de ecuații, procesele hiperbare ce au loc pe durata unor scufundări de sistem de mare adâncime; utilitatea practică a acestui demers, este aceea că, prin aplicarea modelelor propuse, poate fi descrisă, din punct de vedere al variației valorilor mărimilor caracteristice, orice altă scufundare unitară de sistem, indiferent de adâncimea de lucru și de tipul amestecului respirator utilizat;
- capitolele în care sunt urmărite două direcții principale de cercetare și anume o primă direcție care se referă la testele efectuate pe instalația experimentală din Laboratorul Hiperbar al Centrului de Scafandri Constanța, teste ce au avut ca scop prepararea mai multor amestecuri respiratorii, NITROX, HELIOX și TRIMIX, folosind instalația concepută și proiectată de autorii cărții și o a doua direcție care se referă la modelarea matematică a proceselor gazodinamice ce au loc în instalație.

Lucrarea, prin conținutul ei tehnic și științific, se adresează în primul rând specialiștilor din domeniul tehnologiilor hiperbare care creează programe de scufundare și care conduc scufundări unitare sau în saturație bazate pe astfel de tehnologii. De asemenea, cartea este utilă și personalului tehnic din cadrul laboratoarelor hiperbare și echipelor de cercetare și proiectare din domeniul pătrunderii omului sub apă aferente Forțelor Navale, precum și tuturor categoriilor de scafandri profesioniști, militari sau civili.

Autorii cărții aduc mulțumiri colectivului laboratorului Pătrunderea Sub Apă (PSA) din cadrul Centrului de Scafandri Constanța, pentru participarea la realizarea instalației experimentale și la efectuarea testelor experimentale.

Autorii

CUPRINS

	Prefață	4
1	**Aspecte generale privind gazele şi amestecurile de gaze respiratorii folosite în domeniul scufundărilor**	12
1.1	Stadiul actual de dezvoltare al tehnologiilor și instalațiilor hiperbare	12
1.2	Legile gazelor cu aplicaţii în domeniul hidraulicii hiperbare	14
	1.2.1 Legea Boyle – Mariotte	15
	1.2.2 Legea Gay – Lussac şi legea lui Charles	16
	1.2.3 Ecuaţia caracteristică de stare	16
	1.2.4 Legea lui Henry a dizolvării gazelor în lichide	17
	1.2.5 Legea gazelor ideale	18
	1.2.6 Legea lui Dalton şi legea lui Amagat pentru amestecul de gaze	18
1.3	Gaze cu implicații în domeniul scufundărilor	21
	1.3.1 Aerul ca amestec respirator	21
	1.3.2 Azotul din amestecurile respiratorii	22
	1.3.3 Oxigenul din amestecurile respiratorii	24
	1.3.4 Heliul din amestecurile respiratorii	25
	1.3.5 Hidrogenul din amestecurile respiratorii	27
	1.3.6 Neonul din amestecurile respiratorii	29
	1.3.7 Argonul din amestecurile respiratorii	29
	1.3.8 Dioxidul de carbon	29
	1.3.9 Monoxidul de carbon	30
1.4	Amestecuri respiratorii folosite în procesele hiperbare cu aplicații în domeniul scufundărilor	30
	1.4.1 Amestecul respirator binar NITROX	32
	1.4.2 Amestecul respirator binar HELIOX	33
	1.4.3 Amestecul respirator binar HIDROX	34
	1.4.4 Amestecul respirator ternarTRIMIX	35
1.5	Efectele oxigenului din amestecurile respiratorii	36
1.6	Efectele gazelor inerte din amestecurile respiratorii	44
	1.6.1 Efectele azotului din amestecurile respiratorii	46
	1.6.2 Efectele heliului din amestecurile respiratorii	47
	1.6.3 Efectele hidrogenului din amestecul respirator	50
1.7	Rezultatele cercetărilor efectuate în România privind efectele amestecurilor respiratorii	54

2 Procedee de scufundare, instalații, și echipamente hiperbare și aparate de respirat sub apă folosite în domeniul scafandreriei 57
2.1 Procedee de scufundare 57
2.1.1 Scufundările unitare 57
2.1.2 Scufundările în saturație 59
2.2 Echipamente hiperbare folosite în domeniul scafandreriei 61
2.2.1 Barocamerele 61
2.2.2 Turelele de scufundare 63
2.2.3 Laboratoarele submerse 65
2.2.4 Submersibilele purtătoare de scafandri 69
2.3 Aparate de respirat sub apă utilizate în scufundarea profesională 71
2.3.1 Clasificarea echipamentelor de scufundare 71
2.3.2 Clasificarea aparatelor de respirat sub apă 73
2.3.2.1 Clasificarea aparatelor de respirat sub apă din punct de vedere al modului de asigurare cu amestec respirator 74
2.3.2.2 Clasificarea aparatelor de respirat sub apă din punct de vedere al circuitului realizat de amestecul respirator în cadrul aparatului 76

3 Expunerea la presiune şi decompresia scafandrilor 87
3.1 Generalități privind expunerea la presiune și revenirea la presiunea atmosferică a scafandrului 87
3.2 Expunerea organismului scafandrului în cadrul primelor două faze ale proceselor hiperbare cu aer şi amestecuri respiratorii sintetice, binare şi ternare 88
3.2.1 Compresia scafandrului 89
3.2.2 Calculul gradului de saturare a ţesuturilor organismului uman pe timpul expunerilor în cadrul proceselor hiperbare 95
3.3 Revenirea la presiunea atmosferică. Decompresia 95
3.3.1 Modele matematice pentru calculul procedeelor de decompresie 95
3.3.1.1 Modelul „suprasaturaţie multi-ţesut” 97
3.3.1.2 Modelul echilibrului de faze 102
3.3.2 Teorii de decompresie 104
3.3.2.1 Teoria americană de decompresie 105
3.3.2.2 Teoria britanică de decompresie 107
3.3.2.3 Teoria elveţiană de decompresie 109
3.3.2.4 Teoria franceză de decompresie 109
3.3.2.5 Teoria românească de decompresie 110
3.3.3 Decompresia în trepte 111
3.3.4 Decompresia continuă 118

4 Modele matematice pentru descrierea proceselor hiperbare aferente scufundărilor de sistem, de mare adâncime 130

4.1 Elemente generale privind compresia și decompresia scafandrilor în cazul scufundării de sistem 131

4.1.1 Compresia scafandrilor 131

4.1.2 Decompresia scafandrilor 132

4.2 Model matematic pentru descrierea proceselor hiperbare aferente unei scufundări de sistem, unitare, la adâncimea de 180 m, fără vidarea inițială a barocamerei (MMSS-BN) 134

4.2.1 Faza compresiei scafandrilor pentru modelul matematic „cu barocameră nevidată” 135

4.2.2 Faza decompresiei scafandrilor pentru modelul „cu barocameră nevidată” 146

4.2.2.1 Grupul de etape de decompresie 1(GED1-BN) 147

4.2.2.2 Grupul de etape de decompresie 2 (GED2-BN) 152

4.2.2.3 Etapa finală de decompresie (EFD-BN) 161

4.3 Planul unei scufundări de sistem, reale, la adâncimea de 180 m, cu barocameră vidată (PSSR-BV) 163

4.4 Modelul matematic pentru descrierea proceselor hiperbare aferente unei scufundări de sistem, unitare, la adâncimea de 180 m, cu vidarea inițială a barocamerei (MMSS-BV) 171

4.4.1 Faza compresiei scafandrilor pentru modelul „cu barocameră vidată” (FC-BV) 172

4.4.1.1 Grupul de etape de compresie 1 (GEC1-BV) 173

4.4.1.2 Grupul de etape de compresie 2 (GEC2-BV) 175

4.4.2 Faza decompresiei scafandrilor pentru modelul „cu barocameră vidată” (FD-BV) 182

4.4.2.1 Grupul de etape de decompresie 1 (GED1 - BV) 182

4.4.2.2 Grupul de etape de decompresie 2 (GED2-BV) 185

4.4.2.3 Etapa finală de decompresie (EFD-BV) 196

4.4.3 Validarea modelului matematic al unei scufundări cu vidarea barocamerei printr-un test de scufundare reală de sistem, la adâncimea de 180 m 198

5 Fabricarea amestecurilor respiratorii folosite în domeniul scufundărilor 201

5.1 Metoda injectării succesive utilizată la fabricarea amestecurilor respiratorii 201

5.1.1 Realizarea amestecurilor binare NITROX utilizând metoda injectării succesive 202

5.1.2 Realizarea amestecurilor binare HELIOX utilizând metoda injectării succesive 204

5.1.3 Realizarea amestecurilor respiratorii ternare utilizând metoda injectării succesive 205

5.2 Procedeu și instalaţie pentru fabricarea amestecurilor respiratorii NITROX prin injecție succesivă în două etape 206

5.3 Procedee speciale de fabricare a amestecurilor respiratorii binare NITROX 209
5.3.1 Procedeul de preparare a amestecului NITROX cu considerarea presiunilor parțiale ale gazelor 210
5.3.2 Procedeul de preparare a amestecului NITROX cu ajutorul membranelor 211
5.3.3 Procedeul de preparare a amestecului NITROX cu omogenizarea gazelor componente 213
5.4 Metode și procedee de fabricare a amestecurilor respiratorii conform U.S. Navy 216
5.4.1 Metoda de preparare a amestecurilor respiratorii având în vedere presiunile parțiale ale gazelor componente 216
5.4.1.1 Procedeul de calcul în ipoteza gazului ideal 216
5.4.1.2 Procedeul de calcul în ipoteza gazului real 219
5.4.2 Metoda de preparare a amestecurilor respiratorii pe baza volumelor gazelor componente 219
5.4.3 Metoda de preparare a amestecurilor respiratorii prin cântărirea componentelor acestora 220
5.5 Metoda de preparare a amestecurilor respiratorii binare și ternare în flux continuu 221
5.6 Corectarea amestecurilor respiratorii 221
5.6.1 Corectarea amestecurilor respiratorii prin creșterea cantității de oxigen 222
5.6.2 Corectarea amestecurilor respiratorii prin reducerea cantității de oxigen 223
5.7 Omogenizarea amestecurilor de gaze 224
5.8 Înlocuirea amestecurilor respiratori 224

6 Instalație pentru prepararea în flux continuu a amestecurilor gazoase respiratorii, cu posibilitatea livrării directe spre consumator. Concept și principii generale de funcționare 227
6.1 Descrierea instalației pentru prepararea amestecurilor binare HELIOX 228
6.2 Descrierea instalației pentru prepararea amestecurilor binare NITROX 232
6.3 Descrierea instalației pentru prepararea amestecurilor ternare TRIMIX 235
6.4 Descrierea funcționării blocului de control BC și a blocului de injecție masică BIM 238
6.5 Variante posibile de realizare a instalației propuse 241
6.5.1 Instalație de preparare în flux continuu a amestecurilor respiratorii destinată scufundării autonome 241
6.5.2 Instalație de preparare în flux continuu a amestecurilor respiratorii destinată alimentării incintelor presurizate și scafandrilor cu alimentare de la suprafață 242

7 Instalația experimentală destinată validării modelului de calcul aferent metodei de preparare în flux continuu a amestecurilor respiratorii binare NITROX și HELIOX și ternare TRIMIX 246

7.1 Descrierea instalației experimentale folosită pentru prepararea amestecurilor respiratorii binare NITROX și HELIOX și ternare TRIMIX 246

7.2 Prezentarea elementelor componente principale ale instalației experimentale 250

7.2.1 Recipientele pentru stocarea gazelor (buteliile) 250

7.2.2 Reductoarele de presiune 251

7.2.3 Robinetele de reglaj și de separație 252

7.2.4 Manometrele pentru presiuni înalte, medii și joase 254

7.2.5 Blocurile de control. Blocurile de injecție masică 256

7.2.6 Microajutajele de control și injecție 256

7.2.7 Rotametrele pentru controlul debitelor 257

7.2.8 Camera de amestec 259

8 Studii experimentale privind realizarea în flux continuu a amestecurilor respiratorii binare NITROX, HELIOX și ternare TRIMIX utilizând instalația experimentală realizată 261

8.1 Proceduri urmate în cadrul testelor experimentale 261

8.2 Datele obținute în urma testelor experimentale 265

8.3 Relații de calcul utilizate pentru modelarea proceselor gazodinamice aferente instalației experimentale 265

8.3.1 Relații pentru calculul debitelor masice și pentru calculul diametrelor ajutajelor de injecție masică de pe cele trei linii, funcție de citirile la rotametre 268

8.3.2 Relații pentru calculul debitelor masice și volumice și pentru calculul presiunilor de alimentare a ajutajelor de injecție masică de pe cele trei linii, prin calculul termodinamic al ajutajelor 271

8.3.3 Relații pentru calculul diametrelor diafragmelor de măsură și pentru calculul debitelor masice pe cele trei linii funcție de aria colului ajutajelor 274

8.3.4 Relații pentru calculul debitului masic de amestec injectat și a participațiilor masice si volumice ale componentelor, pentru amestecurile NITROX, HELIOX și TRIMIX 276

8.3.5 Condițiile de funcționare în regim critic a ajutajelor de injecție masică de pe cele trei linii 277

8.3.6 Relații practice de calcul a ariei și diametrului colului ajutajului de injecție masică, a debitului masic injectat și a presiunii de alimentare a ajutajului, prin calculul ajutajului sonic și prin citirile la rotametru, pentru cele trei linii 279

8.4 Prelucrarea datelor rezultate din testele efectuate pe instalația experimentală 282

8.4.1 Calculul debitelor masice și volumice injectate și a diametrelor ajutajelor de injecție masică pe baza citirilor la rotametru pentru testele de preparare a amestecurilor NITROX, HELIOX și TRIMIX 282

8.4.2 Determinarea debitelor masice injectate prin calculul termodinamic al ajutajelor de injecție lucrând în regim critic, pentru amestecurile NITROX, HELIOX și TRIMIX și compararea cu debitele obținute cu rotametrele 288

8.4.3 Calculul debitului de amestec injectat și calculul participațiilor masice și volumice ale amestecului, pentru amestecurile NITROX, HELIOX și TRIMIX și comparare cu participațiile volumice determinate prin analiza gazelor 288

8.5 Reprezentarea grafică și analiza comparativă a rezultatelor obținute în cadrul studiilor efectuate privind prepararea în flux continuu a amestecurilor NITROX, HELIOX și TRIMIX 292

8.5.1 Reprezentarea comparativă a valorilor obținute prin calcul și prin măsurători pentru debitul masic de oxigen ($Q_{m,Ox}^{inj}$) și debitul masic de azot ($Q_{m,Ni}^{inj}$), injectate pentru prepararea celor opt amestecuri respiratorii NITROX studiate 294

8.5.2 Reprezentarea comparativă a valorilor obținute prin calcul și prin măsurători pentru debitul masic de oxigen ($Q_{m,Ox}^{inj}$) și debitul masic de heliu ($Q_{m,He}^{inj}$), injectate pentru prepararea celor șapte amestecuri respiratorii HELIOX studiate 295

8.5.3 Reprezentarea comparativă a valorilor obținute prin calcul și prin măsurători pentru debitul masic de oxigen ($Q_{m,Ox}^{inj}$), debitul masic de azot ($Q_{m,Ni}^{inj}$) și debitul masic de heliu ($Q_{m,He}^{inj}$), injectate pentru prepararea celor cinci amestecuri respiratorii TRIMIX studiate 297

8.5.4 Reprezentarea comparativă a valorilor participației volumice a oxigenului (r_{Ox}) și a participației volumice a azotului (r_{Ni}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele opt teste de preparare a amestecurilor respiratorii NITROX 299

8.5.5 Reprezentarea comparativă a valorilor participației volumice a oxigenului (r_{Ox}) și a participației volumice a heliului (r_{He}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele șapte teste de preparare a amestecurilor respiratorii HELIOX 301

8.5.6 Reprezentare comparativă a valorilor participației volumice a oxigenului (r_{Ox}), a participației volumice a azotului (r_{Ni}) și a participației volumice a heliului (r_{He}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele cinci teste de preparare a amestecurilor respiratorii TRIMIX 303

8.5.7 Reprezentarea comparativă a valorilor participației masice a oxigenului (m_{Ox}) și a participației masice a azotului (m_{Ni}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele opt teste de preparare a amestecurilor respiratorii NITROX 305

8.5.8 Reprezentarea comparativă a valorilor participației masice a oxigenului (m_{Ox}) și a participației masice a heliului (m_{He}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele șapte teste de preparare a amestecurilor respiratorii HELIOX 307

8.5.9 Reprezentarea comparativă a valorilor participației masice a oxigenului (m_{Ox}), a participației masice a azotului (m_{Ni}) și a participației masice a heliului (m_{He}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele cinci teste de preparare a amestecurilor respiratorii TRIMIX 308

8.5.10 Reprezentarea comparativă a valorilor participației volumice a azotului (r_{Ni}), în funcție de presiunea de alimentare a ajutajului de injecție, obținute prin două variante de calcul, pentru cele opt teste de preparare a amestecurilor respiratorii NITROX 311

8.5.11 Reprezentarea comparativă a valorilor participației masice a azotului (m_{Ni}), în funcție de presiunea de alimentare a ajutajului de injecție, obținute prin două variante de calcul, pentru cele opt teste de preparare a amestecurilor respiratorii NITROX 312

8.5.12 Reprezentarea comparativă a valorilor participației volumice a heliului (r_{He}), în funcție de presiunea de alimentare a ajutajului de injecție, obținute prin două variante de calcul, pentru cele șapte teste de preparare a amestecurilor respiratorii HELIOX 313

8.5.13 Reprezentarea comparativă a valorilor participației masice a heliului (m_{He}), în funcție de presiunea de alimentare a ajutajului de injecție, obținute prin două variante de calcul, pentru cele șapte teste de preparare a amestecurilor respiratorii HELIOX 314

8.5.14 Reprezentarea comparativă a valorilor participației volumice a oxigenului (r_{Ox}), în funcție de presiunea de alimentare a ajutajului de injecție, obținute prin două variante de calcul, pentru cele cinci teste de preparare a amestecurilor respiratorii TRIMIX 315

8.5.15 Reprezentarea comparativă a valorilor participației masice a oxigenului (m_{Ox}), în funcție de presiunea de alimentare a ajutajului de injecție, obținute prin două variante de calcul, pentru cele cinci teste de preparare a amestecurilor respiratorii TRIMIX 316

8.5.16 Reprezentarea comparativă a valorilor participației volumice ale componentelor din compoziția amestecurilor NITROX, HELIOX și TRIMIX studiate, obținute experimental cu valorile obținute prin calcul 317

BLIOGRAFIE 323

1

ASPECTE GENERALE PRIVIND GAZELE ȘI AMESTECURILE DE GAZE RESPIRATORII FOLOSITE ÎN DOMENIUL SCUFUNDĂRILOR

Explorarea, studierea și exploatarea mediului subacvatic ocupă un rol important în ansamblul activităților umane atât din punct de vedere economic cât și ecologic. De asemenea, domeniul scufundărilor prezintă și un interes militar deosebit datorită faptului că, în cazul unor confruntări armate, acest mediu se poate transforma în teatru de operațiuni militare în desfășurarea cărora un rol important îl reprezintă stăpânirea tehnologiilor hiperbare și utilizarea echipamentului subacvatic. Pentru desfășurarea acestor activități subacvatice, omul trebuie să pătrundă într-un mediu ostil care exercită asupra sa acțiuni adverse, cele mai importante fiind adaptarea la presiuni cu valori mult mai mari decât presiunea atmosferică (hiperbarism) și la lipsa posibilității de a dispune nelimitat de oxigenul necesar vieții.

Procesele hiperbare sunt procese desfășurate în condiții de presiune superioară presiunii normale (atmosferice). Scufundările profesionale, efectuate pentru realizarea de studii științifice și intervenții industriale sau militare, reprezintă un domeniu care implică procese hiperbare.

1.1 STADIUL ACTUAL DE DEZVOLTARE AL TEHNOLOGIILOR ȘI INSTALAȚIILOR HIPERBARE

Dezvoltarea de-a lungul ultimelor patru decenii a tehnologiilor cu aplicații în domeniul scufundărilor a dus la progrese în domeniu, concretizate prin atingerea unor adâncimi și timpi de lucru în imersie tot mai mari. Astfel, prin creșterea adâncimii la care operează și a timpilor de expunere la presiuni ridicate, scafandrii se confruntă cu probleme de natură medicală (fizică și psihică) ce le influențează activitatea. Dintre acestea, bolile asociate decompresiei sunt cele mai întâlnite.

Apariția bulelor de gaz în organism ca urmare a scăderii presiunii a fost observată încă din a doua jumătate a secolului 19 în urma unor experiențe pe animale. La începutul secolului 20 acest fenomen a fost constatat atât în cazul scafandrilor utilitari cât și în cazul lucrătorilor chesonieri, fiind considerată cauza ce duce la apariția bolilor de decompresie. Pornind de la observațiile menționate și pe baza concluziilor ce au decurs din acestea, s-a desprins ca necesară optimizarea procesului de decompresie, fapt ce a condus la creșterea siguranței scafandrilor. Studiile teoretice și experimentale efectuate în decursul timpului au completat cunoștințele rudimentare, empirice, creându-se astfel tabele de

decompresie și modele sofisticate de calcul a acestora ce vin în ajutorul scafandrilor.

În ceea ce privește conducerea și urmărirea proceselor hiperbare aferente scufundărilor simulate sau reale de sistem, în prezent acestea sunt realizate de o echipa „de suprafață” alcătuită din specialiști în inginerie hiperbară care urmăresc evoluția parametrilor în cursul acestor procese (presiuni, participații volumice, presiuni parțiale etc.), tehnicieni chesonieri ce execută manevrele specifice acestor procese hiperbare de la panoul de comandă și medici de hiperbar ce intervin în cazul în care apar probleme medicale la scafandrii supuși compresiei sau decompresiei.

Din experiența de peste 35 de ani de scufundări unitare și în saturație realizate la Centrul de Scafandri Constanța din cadrul Forțelor Navale Române, a apărut necesitatea realizării și urmăririi automate a proceselor specifice acestor scufundări de sistem pentru a elimina eventualele greșeli umane.

În privința preparării amestecurilor gazoase respiratorii, binare sau ternare, utilizate atât la scufundările de sistem cât și la scufundările autonome, în prezent acestea se fabrică printr-o injectare succesivă și controlată a gazelor componente în recipiente cu volum constant, urmărindu-se presiunea din recipiente. Prin această metodă se obțin amestecuri predeterminate ce vor putea fi folosite atât la umplerea recipientelor ce alimentează cu amestec gazos barocamerele sistemelor de scufundare și scafandrii alimentați prin ombilical, cât și la umplerea buteliilor scafandrilor autonomi.

Dat fiind faptul că, în cazul în care adâncimile de scufundare sau tipul scufundării necesită alte amestecuri decât cele deja preparate, considerate ca optime, acest lucru nu poate fi îndeplinit, scufundarea fiind efectuată cu amestecuri deja fabricate și deci cu un randament al scufundării ceva mai redus.

De aceea, s-a impus ca necesară conceperea unei alte metode constând într-o amestecare, în flux continuu, a componentelor gazoase cu injectarea simultană a gazelor componente la proporția dorită, utilizându-se pentru aceasta dispozitive prevăzute cu ajutaje calibrate lucrând în domeniul critic (sonic) ce asigură livrarea componentelor la debite masice constante, independente de adâncimea de scufundare.

Unul dintre cele mai importante roluri în conceperea, proiectarea, realizarea și exploatarea aparatelor destinate adaptării și susținerii omului în mediul subacvatic, îl au gazele și amestecurile de gaze respiratorii. Tipul gazului sau al amestecului respirator este condiționat de doi factori importanți și anume de tipul aparatului de respirat sub apă și de tehnologia de scufundare adoptată. Pentru alegerea corectă a gazului sau a amestecului gazos respirator este necesară cunoașterea cât mai exactă a caracteristicilor fizico-chimice ale gazelor utilizate. De asemenea, pentru a realiza amestecuri de gaze cu diferite concentrații ale componentelor, este necesară cunoașterea tehnologiei de fabricare a acestor amestecuri.

Amestecurile respiratorii reprezintă o compoziție gazoasă omogenă, formată din unul sau două gaze neutre și oxigen. Gazele cele mai folosite în scufundări sunt: oxigenul, azotul, heliul și hidrogenul în amestecuri precum

NITROX (azot și oxigen), HELIOX (heliu și oxigen), TRIMIX (oxigen, azot și heliu) și HIDROX (hidrogen și oxigen). Un alt aspect important, în afara stabilirii compoziției amestecului gazos funcție de adâncimea la care urmează să iși desfășoare activitatea scafandrul sau echipa de intervenție subacvatică, este legată de furnizarea prin intermediul aparatelor a amestecului respirator. La ora actuală, indiferent de tipul scufundării, de sistem sau autonomă, fabricarea amestecului respirator se face prin injectarea succesivă și controlată a gazelor componente în recipiente cu volum constant, urmărindu-se presiunea din acestea. Astfel, se obțin amestecuri predeterminate cu un dozaj considerat corespunzător. În cazul în care adâncimile sau tipul scufundării necesită alte amestecuri decât cele deja preparate, acest lucru nu poate fi realizat imediat, fapt ce duce la efectuarea de scufundări cu randament scăzut.

Prin urmare, pentru domeniul scufundărilor, realizarea amestecului optim de gaze respiratorii, atât din punct de vedere al componentelor folosite și a dozării acestora cât și din punct de vedere al asigurării flexibilității realizării acestuia funcție de necesități, poate fi atinsă prin perfecționarea metodelor de realizare a amestecurilor de gaze pentru procesele hiperbare, acestea conducând la mărirea randamentului scufundării.

În cadrul primei părți a prezentei lucrări, se urmărește elaborarea unui studiu teoretic, de documentare, privind gazele și amestecurile de gaze utilizate în domeniul scufundărilor cât și abordarea unor teme care vor conduce la rezultate practice cu aplicabilitate directă în domeniul scufundărilor profesionale.

1.2 LEGILE GAZELOR CU APLICAȚII ÎN DOMENIUL HIDRAULICII HIPERBARE

Gradul de organizare a particulelor constituente ale substanțelor scade de la cele solide cristaline la cele lichide, iar la substanțele în stare gazoasă este inexistent. Forțele de interacțiune dintre particule scad în același sens. Rezultă deci, că substanțele solide au forțele de interacțiune puternice ceea ce duce la puncte de fierbere și de topire mari, iar în cazul gazelor aceste constante fizice sunt mai mici datorită forțelor de interacțiune foarte slabe.

În stare gazoasă, materia este rarefiată, particulele constituente, atomii sau moleculele, se găsesc la distanțe foarte mari, astfel încât interacțiunile lor sunt foarte slabe. Datorită acestora, particulele, moleculele sau atomii gazelor tind să ocupe tot spațiul care le stă la dispoziție, adică au cea mai mare expansibilitate dintre toate stările de agregare. În condiții de temperatură și presiune obișnuite, mișcarea particulelor, moleculelor sau atomilor este foarte rapidă. Din acest motiv, în teoria cinetică a gazelor, moleculele sunt considerate fără dimensiuni, ca puncte. În raport cu volumul vasului pe care îl ocupă, volumul propriu al moleculelor este foarte mic.

Gazele se numesc perfecte sau ideale atunci când moleculele lor pot fi considerate punctiforme și nu exercită interacțiuni între ele. Starea de gaz

perfect se poate aplica și gazelor reale, atunci când acestea se află la o presiune nu foarte mare și la o temperatură nu foarte scăzută.

Presiunea exercitată uniform asupra pereților recipientului în care se află gazul este determinată de ciocnirile dintre molecule.

Presiunea, potrivit teoriei cinetico-moleculare a gazelor, se calculează funcție de energia cinetică medie a mișcării de translație a moleculelor conținute în unitatea de volum.

Legile gazelor perfecte au fost descoperite empiric și au fost explicate cu ajutorul teoriei cinetice a gazelor, conform căreia un gaz este format din molecule sferice perfect elastice. Mișcarea acestor molecule este în toate sensurile, fără a avea o direcție preferențială, cu o viteză care crește o dată cu temperatura.

O primă teorie în stabilirea legilor teoriei cinetice a gazelor a fost emisă de Clausius, care a considerat moleculele perfect sferice, elastice și animate numai de mișcare de translație. Ipotezele nu sunt în totalitate adevărate, moleculele executând și mișcări de rotație, oscilație și vibrație.

Teoria lui Clausius a fost completată de teoriile lui Boltzman și Maxwell potrivit cărora moleculele au diferite viteze care variază de la zero la infinit, existând însă o viteză, cea mai probabilă, la o anumită temperatură.

Alte teorii care au contribuit la stabilirea legilor teoriei cinetice a gazelor au stabilit că acestea sunt influențate de trei mărimi fizice și anume presiunea, temperatura și volumul. Modificarea oricăruia dintre cei trei factori duce la variația celorlalți doi.

Teoria cinetică a gazelor afirmă că energia cinetică a unui gaz aflat la o temperatură dată este aceeași pentru orice gaz aflat în același condiții de temperatură. Așadar, presiunea tuturor gazelor, rezultată ca urmare a activității cinetice, este influențată de aceiași factori. Exprimările matematice ale relațiilor dintre aceste trei mărimi fizice au fost denumite legi ale gazelor.

1.2.1 Legea Boyle – Mariotte

Această lege afirmă că, în cazul oricărui gaz aflat la temperatură constantă, volumul acestuia variază invers proporțional cu presiunea:

$$p_1V_1 = p_2V_2 \quad , \tag{1.1}$$

sau exprimată într-o formă generală:

$$pV = \text{constant} \tag{1.2}$$

în care: p_1 este presiunea inițială a gazului (sc. abs.), p_2 - presiunea finală gazului (sc. abs.), V_1 - volumul inițial al gazului, V_2 - volumul final al gazului, p - presiunea gazului (sc. abs.), V - volumul gazului.

În cazul domeniului scufundărilor, legea lui Boyle – Mariotte are o importanță deosebită fiind legată de variația volumului funcție de modificarea presiunii. Astfel, unui scufundător în apnee i se va modifica volumul plămânilor odată cu pătrunderea în adâncime, urmată de creșterea volumului în timp ce acesta revine la suprafață. Conform National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) al S.U.A, la adâncimea de 10 m la care presiunea este de 2 bar (sc. abs.) volumul plămânilor scade cu 50%, la 30 m la care presiunea este de 4 bar (sc. abs.) acesta se reduce la 25%, iar la 90 m la care presiunea este de 10 bar (sc. abs.) volumul este de 10 % din cel inițial (în condiții normale). Este evident că aceste modificări pot avea consecințe fatale asupra scufundătorului. Totuși ele pot fi evitate prin cunoașterea și aplicarea unor tehnici corespunzătoare de scufundare.

1.2.2 Legea Gay – Lussac și legea lui Charles

Variația temperaturii influențează presiunea și volumul unui gaz. Această realitate fizică este exprimată matematic prin intermediul legii Gay – Lussac și a legii lui Charles.

Relația matematică dintre volum, presiune și temperatură este:

$$\frac{V}{T} = \frac{2}{3}\frac{M \cdot a}{p} = \text{constant} \quad . \tag{1.3}$$

Așa cum se desprinde din cele prezentate anterior, legea Gay – Lussac afirmă că, la o presiune constantă, raportul între volumul unei mase constante de gaz și temperatura sa absolută este constant. Legea lui Charles exprimă că, pentru un volum constant al unui gaz ideal, raportul dintre presiune și temperatura absolută este, de asemenea, constant:

$$\frac{p}{T} = \frac{2}{3}\frac{M \cdot a}{V} = \text{constant} \quad . \tag{1.4}$$

Mărimile fizice din relațiile anterioare au următoarele semnificații: V este volumul de gaz, T - temperatura absolută a gazului, M - masa de gaz, a - coeficientul de proporționalitate al gazelor, p - presiunea gazului (sc. abs.).

1.2.3 Ecuația caracteristică de stare

Pornind de la legile Boyle – Mariotte și Gay – Lussac se obține ecuația caracteristică de stare, dedusă de Clapeyron:

$$pV = MRT \quad , \tag{1.5}$$

sau

$$p\frac{V}{M}=RT\quad, \tag{1.6}$$

sau

$$pv=RT\quad, \tag{1.7}$$

în care: p este presiunea gazului, V - volumul de gaz, M - masa gazului, T - temperatura absolută a gazului, v - volumul specific, R - constanta caracteristică a gazului ideal dependentă de masa lui molară:

$$R=\frac{\mathscr{R}}{\mathscr{M}} \tag{1.8}$$

în care: $\mathscr{R}$ este constanta universală a gazelor, $\mathscr{M}$ - masa molară a gazului.

1.2.4 Legea lui Henry a dizolvării gazelor în lichide

Această lege se referă la dizolvarea gazelor în lichide, aspect ce este în strânsă legătură cu procesele ce au loc în organismul uman odată ce acesta este supus variațiilor de presiune. Legea lui Henry afirmă că, la temperatură constantă, masa de gaz dizolvată într-un lichid, la saturație, variază direct proporțional cu presiunea parțială a gazului aflat în contact cu lichidul:

$$\frac{V_G}{V_L}=\alpha p_1 \tag{1.9}$$

în care: V_G este volumul de gaz dizolvat în condiții de presiune și temperatură standard, V_L - volumul de lichid, α - coeficientul de solubilitate, dependent de temperatură, p_1 - presiunea parțială a gazului aflat în contact cu lichidul.

Legea lui Henry se exprimă și în forma:

$$p=k_H C \tag{1.10}$$

în care: p este presiunea parțială a gazului aflat în contact cu lichidul, C - concentrația gazului dizolvat, k_H - constanta legii lui Henry.

În concordanță cu cele prezentate anterior, cu cât scafandrul pătrunde la o adâncime din ce în ce mai mare, deci cu cât valoarea presiunii crește, cantitatea de gaz dizolvată în țesuturi crește și ea. La revenirea la suprafață această cantitate de gaz dizolvată va fi eliberată. În consecință, decompresia scafandrilor trebuie astfel realizată încât să evite eliberarea gazului dizolvat (în cazul scafandrilor, azotul, heliul sau hidrogenul) cu apariția bulelor de gaz în organism, evitându-se astfel bolile asociate decompresiei.

De asemenea, pe lângă presiune, un alt factor important ce influențează cantitate de gaz dizolvată în organism îl reprezintă durata în care gazul este respirat. În funcție de natura gazului și evident de presiunea la care este respirat, durata de saturare cu gaz a organismului variază în limite destul de largi (8 – 24 ore conform NOAA).

1.2.5 Legea gazelor ideale

Așa cum s-a desprins și din cele prezentate anterior, presiunea, temperatura și volumul sunt mărimi ce se influențează reciproc.

Legea gazelor ideale este utilă în estimarea modificărilor ce survin în cazul unei cantități de gaz atunci când valoarea uneia sau a tuturor măririlor menționate anterior se modifică. Matematic, această lege se exprimă astfel:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \tag{1.11}$$

în care: $p_{1/2}$ este presiunea inițială/ finală a gazului (scară absolută), $V_{1/2}$- volumul inițial/ final al gazului, $T_{1/2}$- temperatura inițială/ finală a gazului (absolută), sau

$$\frac{pV}{T} = \text{constant} \tag{1.12}$$

Pentru gazul ideal, raportul căldurilor specifice k, numit exponent adiabatic se poate exprima sub forma:

$$k = \frac{c_p}{c_V} = \frac{c_V + R}{c_V} = 1 - \frac{R}{c_V} \tag{1.13}$$

unde: c_p este căldura specifică la presiune constantă, c_V - căldura specifică la volum constant, $R = c_p - c_V$ - constanta gazului.

1.2.6 Legea lui Dalton și legea lui Amagat pentru amestecul de gaze

Aplicațiile în domeniul scufundărilor ale legii lui Dalton se referă la calculul diferenței dintre presiunile parțiale ale componentelor amestecului de gaze, în cadrul respirației, în condiții normale, respectiv la diverse adâncimi. Această lege arată că, la o temperatură dată, presiunea unui amestec gazos p_{am} este egală cu suma presiunilor parțiale ale fiecărui gaz component $p_i (i = 1, 2 \ldots n)$. Astfel, în conformitate cu legea lui Dalton, presiunea totală a unui amestec gazos respirator este dată de suma presiunilor parțiale a componentelor conform relației (1.14):

$$p_{am} = \sum_{i=1}^{n} p_i = p_1 + p_2 + \ldots + p_i + \ldots + p_n \tag{1.14}$$

Presiunea parțială a unui component dintr-un amestec de gaze reprezintă presiunea pe care acesta ar exercita-o dacă ar ocupa singur întregul volum. Determinarea presiunii parțiale a unui gaz, p_i, dintr-un amestec se determină aplicând relația:

$$p_i = r_i \cdot p_{am} \tag{1.15}$$

în care: r_i este participația volumică a componentului i, p_{am} - presiunea totală a amestecului de gaze (sc. abs.).

Legea lui Amagat se exprimă matematic prin relația:

$$\sum_{i=1}^{n} r_i = r_1 + r_2 + \ldots + r_i + \ldots + r_n = 1 \tag{1.16}$$

unde r_i reprezintă participațiile volumice ale componentelor amestecului de gaze.

Participația volumică a unui component r_i reprezintă raportul dintre volumul redus al componentului V_i și volumul amestecului V_{am}:

$$r_i = \frac{V_i}{V_{am}} \tag{1.17}$$

Deci, presiunea parțială a unui gaz component dintr-un amestec de gaze se obține prin înmulțirea presiunii amestecului de gaze p_{am} cu participația volumică r_i a gazului component considerat.

Participația masică m_i reprezintă raportul dintre masa unui component oarecare M_i și masa amestecului M_{am}:

$$m_i = \frac{M_i}{M_{am}} \tag{1.18}$$

Pentru n componenți, relația de calcul este:

$$\sum_{i=1}^{n} m_i = 1 \tag{1.19}$$

Aplicând ecuația caracteristică de stare a gazelor ideale pentru un component din amestec și pentru întreg amestecul, se pot obține relații de calcul între participația volumică și participația masică astfel:

$$p_{am}V_i = M_i R_i T_{am} \tag{1.20}$$

$$p_{am}V_{am} = M_{am}R_{am}T_{am} \tag{1.21}$$

Prin împărțirea celor două relații rezultă:

$$r_i = m_i \frac{R_i}{R_{am}} \tag{1.22}$$

sau

$$r_i = m_i \frac{\mathcal{M}_{am}}{\mathcal{M}_i} \tag{1.23}$$

unde: p_{am} este presiunea amestecului (sc. abs.), M_i, M_{am} - masa componentului i, respectiv a amestecului, R_i, R_{am} - constanta caracteristică a componentului i, respectiv a amestecului, V_i, V_{am} - volumul redus al componentului i, respectiv volumul amestecului, T_{am} - temperatura amestecului (absolută), r_i - participația volumică a componentului i, m_i - participația masică a componentului i, $\mathcal{M}_i, \mathcal{M}_{am}$ - masa molară a componentului i, respectiv a amestecului.

De asemenea, din relațiile:

$$p_{am}V_i = M_i R_i T_{am} \tag{1.24}$$

$$p_i V_{am} = M_i R_i T_{am} \tag{1.25}$$

prin împărțirea lor, rezultă relația de legătură între presiunea parțială a componentului p_i funcție de participația lui volumică:

$$p_i = r_i p_{am} \tag{1.26}$$

Căldura specifică a amestecului de gaze are expresia:

$$c_{am} = \sum_{i=1}^{n} m_i c_i \tag{1.27}$$

1.3 GAZE CU IMPLICAȚII ÎN DOMENIUL SCUFUNDĂRILOR

În decursul a peste 160 de decenii ce s-au scurs de la consemnarea în lucrarea De Re Militari, cunoscută și ca Epitoma rei militaris, elaborată de Publius Flavius Vegetius Renatus a unor aparate pentru lupta subacvatică ce foloseau aerul ca gaz respirator, s-au conceput și creat aparate din ce în ce mai complexe, și s-au pus la punct proceduri, tehnici și tehnologii pentru pătrunderea omului la adâncimi din ce în ce mai mari.

La ora actuală, în funcție de tipul aparatului de respirat utilizat în scufundare și de tehnologia de scufundare adoptată, sunt folosite diverse gaze sau amestecuri de gaze respiratorii ce sunt prezentate în continuare.

1.3.1 Aerul ca amestec respirator

Aerul (aerul atmosferic) este primul și cel mai folosit gaz utilizat în domeniul scufundărilor. Acesta este un amestec de gaze inerte și metabolice fiind alcătuit, în principal, din azot și oxigen și în a cărui compoziție intră, în cantități variabile, și dioxid de carbon, vapori de apă, ozon, dioxid de sulf, dioxid de azot și, în cantități foarte mici (urme), xenon, heliu, kripton, argon, metan, oxid de azot, hidrogen și neon. Proporțiile în care aceste elemente se găsesc în aer sunt de 78,1% azot, 20,9% oxigen, iar restul de 1% este alcătuit din celelalte componente (tabelul 1.1).

Tabelul 1.1 Compoziția aerului atmosferic uscat (conform NOAA)

Component	Procente din volum (%)	Părți pe milion (ppm)
Azot	78,084	-
Oxigen	20,946	-
Argon	0,934	-
Dioxid de carbon	0,033	-
Gaze rare	0,033	30,00*
Neon	-	18,18*
Heliu	-	5,24*
Monoxid de carbon	-	2,36*
Metan	-	2,00*
Krypton	-	1,14*
Hidrogen	-	0,5*
Protoxid de azot	-	0,5*
Xenon	-	0,08*

* - valori aproximative
NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration al S.U.A.

Ca urmare a poluării atmosferice, pe lângă componentele mai sus menționate, aerul atmosferic mai poate conține și alte elemente, un exemplu în acest sens fiind prezența monoxidului de carbon apărut ca urmare a arderilor din motoarele cu combustie internă. Acești poluanți trebuie eliminați din

compoziția aerului înainte ca acesta să fie utilizat ca gaz respirator pentru scufundări.

Compoziția chimică a aerului determină schimbul de gaze dintre organism și mediu. Volumul de aer inhalat zilnic de către ființele umane în condiții normale este de circa 14...15 m^3 de aer.

La nivelul aparatului respirator, contactul dintre aer și organism se realizează pe o suprafață de peste 90 m^2. În urma procesului respirator se produc modificări ale compoziției aerului (tabelul 1.2).

Tabelul 1.2 Modificări ale compoziției aerului ca urmare a procesului respirator

Component	**Proporția componentelor din aer [%]**	
	inspirat	expirat
Azot	78…79	78…79
Oxigen	20..21	16…17
Dioxid de carbon	0,03...0,04	3...4

Pentru o compoziție a aerului cu un conținut de 21% oxigen și 79% azot, valorile principalelor caracteristici fizice sunt date în tabelul 1.3.

Tabelul 1.3 Caracteristicile fizice ale aerului având un conținut de 21% oxigen și 79% azot

Amestec AER	r_{Ox}	r_{Ni}	$\mathcal{M}_{aer}$	R_{aer}	$c_{p,aer}$	$c_{v,aer}$
O2[%]/Ni [%]	[-]	[-]	[kg/(kmol)]	[J/(kgK)]	[J/(kgK)]	[J/(kgK)]
21/79	0,21	0,79	28,85	288	1011	723

Aerul atmosferic poate fi utilizat în condiții de siguranță doar pentru scufundări la adâncimi mici, de circa 30 m. În cazul scufundărilor de adâncime, la revenirea la suprafață, scafandrul poate suferi accidente în cazul unei reveniri necorespunzătoare la presiunea atmosferică.

1.3.2 Azotul din amestecurile respiratorii

Denumirea de azot a fost dată acestui element chimic de către savantul francez Antoine Laurent de Lavoisier (1773), „a” însemnând în limba greacă fără, iar „zoon” viață. Ulterior, a fost denumit și nitrogen care semnifică generator de salpetru.

Azotul este gazul aflat în cea mai mare proporție în compoziția aerului atmosferic (tabelul 1.1). Din punct de vedere organoleptic, acest gaz biatomic este incolor, inodor și insipid. Este puțin solubil în apă. Face parte din categoria elementelor chimice cu caracter nemetalic din gupa a V-a principală Z7. Masa atomică a azotului are valoarea 14,0067. Structura electronică a stratului exterior este 2s2p3, iar valența I, II, III, IV, V. Punctul de fierbere al azotului – 195,8^{o}C, iar punctul de topire - 210^{o}C. Ca urmare a căldurii de dislocare mari a moleculei N_2, deci a legăturii N ≡ N foarte puternice, reactivitatea chimică a

azotului molecular este foarte redusă. La temperaturi mari și în prezența catalizatorilor, capacitatea de a reacționa a azotului crește putându-se combina cu H_2, O_2 și unele metale. După fluor și oxigen, azotul este elementul cu caracterul electronegativ cel mai puternic. În combinațiile chimice cu cele două elemente menționate anterior, se consideră că azotul funcționează într-o stare de oxidare pozitivă, iar în combinație cu hidrogenul și metalele acesta funcționează ca element electronegativ. Unele dintre proprietățile fizico-chimice ale azotului sunt prezentate în tabelul 1.4.

Tabelul 1.4 Caracteristicile fizico-chimice ale azotului

Mărimea	Unitatea de măsură	Valoarea
Volumul molar	[m^3/kmol]	22,403
Masa molară	[kg/kmol]	28,013
Temperatura critică	T_{cr} [K]	126,1
Temperatura de fierbere la 1,013 bar (sc.abs.)	T_f [K]	77,4
Conductibilitatea termică	k [µcal/cm s K]	58,0
Coeficientul de autodifuzie	D [cm^2/s]	0,178
Densitatea	ρ [g/l]	1,251
Coeficientul dinamic de viscozitate	μ [micropoise]*	167,4
Căldura specifică masică la volum constant	c_v [cal/gK]	0,177
Constante Van der Waals	a – at/(l/mol)^2 b – l/mol	1,39 0,0394
Presiunea critică	p_{cr} [ata]**	33,5
Diametrul moleculei	[Å]***	3,76
Solubilitatea în apă	[l/l]	0,0155
Solubilitatea în alcool etilic	[l/l]	0,1304
Solubilitatea în benzen	[l/l]	0,1038

*1 micropoise = 10^{-3} poise = 10^{-3} g/(cm s) = dyn s/cm^2; **ata – atmosferă în scara absolută; ***Å – angström (1 Å = 10^{-8} cm)

O altă caracteristică importantă o constituie proprietatea azotului de a nu fi inflamabil, aceasta în antiteză cu oxigenul care din acest punct de vedere se află la polul opus.

Azotul poate fi obținut în laborator prin descompunerea azotitului de amoniu sau a unei soluții de NH_4Cl și $NaNO_2$ (relația 1.28), iar industrial prin distilarea fracționată a aerului lichid:



$$NH_4NO_2 \rightarrow N_2 + 2H_2 \quad (1.28)$$

Azotul intră în compoziția chimică a tuturor organismelor vii fapt ce face ca în natură să aibă loc un circuit al azotului.

Deoarece, prin procesul respirator, azotul se dizolvă cu ușurință în țesuturi și ajunge în sânge fără însă a lua parte la procesele metabolice, el se încadrează în categoria gazelor inerte. Cu toate acestea, odată cu scăderea presiunii mediului ambiant, solubilitatea sa crescută duce la formarea de bule, o mare problemă în cazul procesului de decompresie al scafandrilor. Așadar, în

condiții normale, azotul este inert din punct de vedere fiziologic, dar odată cu creșterea presiunii parțiale acesta prezintă proprietăți anestezice, ce se manifestă prin pierderea conștienței și apariția dezorientării (narcoză). În articolul „Mixed Gas in Diving” se precizează că, la presiuni ale azotului ce depășesc 60 m (coloană apă de mare), se instalează o stare de euforie excesivă și se reduce capacitatea funcțională, mentală și fizică a scafandrului, iar peste 180 m (coloană apă de mare) rezultă pierderea conștienței. Lucrarea precizează că toleranța individuală poate varia semnificativ în funcție de activitatea desfășurată pe durata scufundării. În cazul scufundărilor de mare adâncime, simptomele pot apărea în faza de început în timp diminuându-se însă. Modificările survenite la nivelul aparatului respirator odată cu creșterea presiunii reduc considerabil capacitatea de ventilare în cazul utilizării amestecurilor conținând azot.

Deși prezintă dezavantaje în comparație cu alte gaze, în domeniul scufundărilor azotul este folosit pentru a dilua oxigenul, fie în amestecul natural ce alcătuiește aerul atmosferic, fie în amestecuri sintetice.

1.3.3 Oxigenul din amestecurile respiratorii

Fiind un element indispensabil vieții, importanța oxigenului în domeniul scufundărilor este evidentă. Scăderea conținutului de oxigen din amestecul respirator sub 7% produce moartea. Așa cum s-a arătat și în subcapitolul anterior, aerul atmosferic conține 21% oxigen ce există liber, în stare biatomică. Acest gaz reprezintă elementul chimic cel mai răspândit din natură fiind, de asemenea, și o componentă a materiei organismelor vii. Oxigenul este un gaz incolor, inodor și insipid ce se combină cu mare ușurință cu alte elemente chimice. În stare lichidă și solidă are culoare albastră. Face parte din grupa a VI - a principală, Z8, are structura electronică a stratului exterior $1s^2 2s^2 2p^4$, valența II și masa atomică 15,999. În aerul atmosferic se găsește în stare liberă, iar în stare combinată în apă și diverse minerale precum oxizi, silicați, carbonați, sulfați. În apă solubilitatea oxigenului este redusă. Punctul de fierbere al oxigenului este - 183^oC și punctul de topire al acestuia este de - 218 ^oC.

Pentru caracterizarea oxigenului, în tabelul 1.5 sunt prezentate o serie din proprietățile fizico-chimice ale acestui element chimic.

În combinațiile sale, oxigenul funcționează ca element bivalent electronegativ. Oxigenul formează combinații cu toate elementele chimice, excepție fac însă gazele rare.

Obținerea oxigenului prin procese industriale se realizează prin distilarea fracționată a aerului lichid și prin electroliza apei. Aflat în stare pură, lipsit de azot, oxigenul se poate obține prin descompunerea termică a oxizilor și a unor săruri.

Oxigenul este singurul gaz ce poate fi folosit ca atare de către scafandri în incursiunile lor în mediul acvatic. Cu toate acestea inhalarea de oxigen pur are efecte neurotoxice atunci când este inhalat la presiuni ridicate, iar în cazul inhalării continue pe timp îndelungat, chiar în condiții normale de presiune,

produce leziuni pulmonare. Deși primul aspect a fost descris încă din anul 1878 de Paul Bert, iar cel de al doilea de Lorrain și Smith, în 1899 s-au înregistrat în decursul timpului numeroase accidente la utilizarea oxigenului ca gaz respirator. Trebuie spus că, din componentele aerului atmosferic, doar oxigenul este folosit de corpul uman, restul componentelor în proporție de aproximativ 79% servesc pentru a dilua oxigenul.

Tabelul 1.5 Caracteristicile fizico-chimice ale oxigenului

Mărimea	**Unitatea de măsură**	**Valoarea**
Volumul molar	[m^3/kmol]	22,403
Masa molară	[kg/kmol]	31,999
Temperatura critică	T_{cr} [K]	154,4
Temperatura de fierbere la 1,013 bar (sc.abs.)	T_f [K]	90,2
Conductibilitatea termică	k [μcal/cm s K]	58,5
Coeficientul de autodifuzie	D [cm^2/s]	0,189
Densitatea	ρ [g/l]	1,429
Coeficientul dinamic de viscozitate	μ [micropoise]	192,6
Căldura specifică masică la volum constant	c_v [cal/gK]	0,157
Constante Van der Waals	a – at/(l/mol)^2 b – l/mol	1,36 0,0318
Presiunea critică	p_{cr} [ata]	49,7
Diametrul moleculei	[Å]	3,62
Solubilitatea în apă	[l/l]	0,0314
Solubilitatea în alcool etilic	[l/l]	0,1431
Solubilitatea în benzen	[l/l]	0,163

În lucrarea „Physics of Diving” elaborată de National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) al S.U.A., sunt prezentate o serie de aspecte legate de utilizarea oxigenului pentru scufundări. De exemplu, oxigenul pur (concentrație 100%) este folosit la scufundările de mică adâncime și în anumite faze ale scufundărilor de mare adâncime. Pentru scufundarea în saturație și pentru scufundări de mare adâncime concentrația oxigenului poate avea valori mai scăzute. Lucrarea menționată anterior precizează că recipientele conținând amestecuri sărace în oxigen necesită etichetare și manipulare specială evitându-se astfel inhalarea lor accidentală. Respirarea unor amestecuri anoxice va genera, doar în câteva momente, pierderea conștienței, leziuni cerebrale și în final moartea.

1.3.4 Heliul din amestecurile respiratorii

Heliul este un element chimic ce face parte din grupa gazelor rare, Z2 cu structura electronică $1s^2$. Unele din proprietățile sale sunt date în tabelul 1.6. Așa cum s-a prezentat anterior, în subcapitolul 1.1 conținutul de heliu din aerul atmosferic este de $5{,}2 \cdot 10^{-1}$ % volume. Punctul de topire al heliului este -272,1°C la presiunea de 25 atm, iar punctul de fierbere este -268,98°C.

Denumirea acestui gaz incolor, monoatomic provine din limba greacă „Helios” desemnând Soarele prin a cărui spectrografie s-a descoperit, în anul 1868, acest element chimic.

Ca urmare a densității sale scăzute, fiind de 70 de ori mai ușor ca aerul, a fost folosit la începutul secolului XX pentru umplerea aerostatelor.

Heliul se găsește în cantități ceva mai mari în gazele naturale din unele zone ale Americii și de pe teritoriul Federației Ruse. Heliul se poate obține din aerul atmosferic folosind ca procedeu de separare lichefierea. În urma aplicării acestui procedeu, heliul rămâne împreună cu neonul în fracțiunea necondensată, separarea acestora urmând a fi făcută ulterior utilizându-se în acest scop adsorbția pe cărbune activ, metodă ce duce la reținerea neonului. Este gazul cel mai greu de lichefiat.

Tabelul 1.6 Proprietățile fizico-chimice ale heliului

Mărimea	**Unitatea de măsură**	**Valoarea**
Volumul molar	[m^3/kmol]	22,43
Masa molară	[kg/kmol]	4,002
Temperatura critică	T_{cr} [K]	5,26
Temperatura de fierbere la 1,013 bar (sc.abs.)	T_f [K]	4,26
Conductibilitatea termică	*k* [µcal/cm s K]	352
Coeficientul de autodifuzie	*D* [cm^2/s]	-
Densitatea	ρ [g/l]	0,1785
Coeficientul dinamic de viscozitate	μ [micropoise]	188,7
Căldura specifică masică la volum constant	c_v [cal/gK]	0,745
Constante Van der Waals	a – at/(l/mol)^2 b – l/mol	0,034 0,0236
Presiunea critică	p_{cr} [ata]	2,26
Diametrul moleculei	[Å]	2,17
Solubilitatea în apă	[l/l]	0,0088
Solubilitatea în alcool etilic	[l/l]	0,0281
Solubilitatea în benzen	[l/l]	0,018

În domeniul scufundărilor, heliul este folosit frecvent pentru scufundări de mare adâncime ca diluant al oxigenului. Densitatea lui este mai mică decât cea a azotului, fapt ce îi conferă diverse avantaje ce se referă la reducerea rezistenței la respirație în cazul scufundărilor de adâncime și la lipsa unor efecte similare privind narcoza.

Dezavantajele utilizării heliului în scufundări sunt reprezentate de distorsionarea spectrului sonor, fapt ce afectează comunicarea dintre membrii echipei de scufundare și răcirea rapidă a organismului, în special ca urmare a proceselor respiratorii, cauza fiind conductibilitatea termică foarte ridicată a acestui gaz.

1.3.5 Hidrogenul din amestecurile respiratorii

Hidrogenul este un gaz biatomic incolor, insipid și inodor. Lichefierea lui este foarte dificilă situându-se, din acest punct de vedere, pe locul doi după heliu. Deoarece este foarte activ, se găsește extrem de rar în stare liberă. Este cel mai ușor dintre gaze și are viteza cea mai mare de difuziune. Acest element chimic, nemetalic, are masa atomică 1,00797, structura electronică $1s^1$ și valența 1. Punctul de fierbere al hidrogenului este -252,8°C și punctul de topire este -259,14°C. Pentru caracterizarea hidrogenului din punct de vedere fizico-chimic, în tabelul 1.7 sunt date principalele caracteristici ale acestuia.

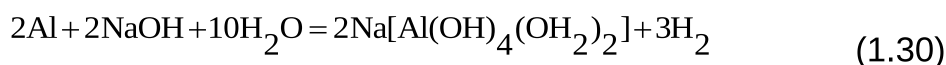
Tabelul 1.7 Proprietățile fizico-chimice ale hidrogenului

Mărimea	Unitatea de măsură	Valoarea
Volumul molar	[m^3/kmol]	22,428
Masa molară	[kg/kmol]	2,016
Temperatura critică	T_{cr} [K]	33,3
Temperatura de fierbere la 1,013 bar (sc.abs.)	T_f [K]	20,4
Conductibilitatea termică	k [μcal/cm s K]	416
Coeficientul de autodifuzie	D [cm^2/s]	1,285
Densitatea	ρ [g/l]	0,0899
Coeficientul dinamic de viscozitate	μ [micropoise]	85
Căldura specifică masică la volum constant	c_v [cal/gK]	2,411
Constante Van der Waals	a – at/(l/mol)^2 b – l/mol	0,245 0,0267
Presiunea critică	p_{cr} [ata]	12,8
Diametrul moleculei	[Å]	2,72
Solubilitatea în apă	[l/l]	0,0182
Solubilitatea în alcool etilic	[l/l]	0,0769
Solubilitatea în benzen	[l/l]	0,0659

În stare liberă, se găsește în unele gaze emanate din scoarța Pământului, în apă și în substanțe organice. Hidrogenul se poate obține ca urmare a interacțiunii dintre acizii diluați și unele metale, prin acțiunea unei soluții destul de concentrate de hidroxid de sodiu asupra unor elemente precum Zn, Al și prin descompunerea apei de către metale alcaline. Industrial, hidrogenul se obține în stare pură prin electroliza apei, din gazul de apă. Practic se realizează electroliza unor soluții alcaline.



$$Zn + H_2SO_4 = H_2 + ZnSO_4 \tag{1.29}$$



$$2Al + 2NaOH + 10H_2O = 2Na[Al(OH)_4(OH_2)_2] + 3H_2 \tag{1.30}$$



$$M + H_2O = MOH + 1/2H_2 \tag{1.31}$$

Hidrogenul se combină direct cu cea mai mare parte a nemetalelor, formând astfel combinații moleculare volatile. Prin urmare, reacționează energetic cu halogenii. Are, de asemenea, proprietatea, prin punerea în comun a electronul său cu electronul altor elemente, de a stabili legături covalente. Acest element chimic se combină la cald cu sulful, iar în anumite condiții cu azotul. Față de o parte dintre oxizii metalici funcționează ca agent reducător (de exemplu $CuO + H_2 = Cu + H_2O$).

Trebuie remarcat faptul că amestecul dintre H_2 și O_2 în raport de 2:1 explodează dacă există premise pentru apariția unei scântei electrice.

În general, hidrogenul este utilizat la sinteza amoniacului, la hidrogenarea unor substanțe organice, la obținerea combustibililor lichizi sintetici.

Utilizarea hidrogenului în amestecuri gazoase respiratorii este consemnată pentru prima oară în 1789, când Lavoisier și Seguin derulează în acest sens studii experimentale de laborator folosind ca subiecți animale mici. Amestecul respirator studiat era format din hidrogen și oxigen. În urma studiului efectuat, ei au constatat că oxigenul consumat în cazul amestecului hidrogen-oxigen era similar celui consumat pentru respirație în cazul amestecului azot-oxigen.

Deși au mai existat studii ulterioare privind folosirea hidrogenului în amestecuri respiratorii, utilizarea lui în domeniul scufundărilor este atribuită inginerului suedez Arne Zetterstrom (1944). Scopul utilizării hidrogenului era de a înlocui azotul și heliul din amestecurile respiratorii utilizate pentru scufundări. Deoarece este elementul chimic cu cea mai mică densitate, la presiuni exterioare mari rezistența la respirație va fi minimă. Așa cum s-a menționat anterior, principala problemă a utilizării hidrogenului în asociere cu oxigenul, o reprezintă pericolul de explozie. Deși concentrația de oxigen necesară producerii combustiei variază cu presiunea, o regulă generală este că prezența oxigenului într-o proporție de peste 4% (unii autori menționează valoarea de 5%) în amestecul hidrogen-oxigen prezintă risc de explozie spontană. Astfel, hidrogenul poate fi folosit în amestecul respirator în cazul presiunilor la care mai puțin de 5% O2 asigură o presiune parțială de oxigen suficientă pentru a susține funcțiile vitale.

Deoarece Arne Zetterstrom moare într-un accident în timpul revenirii la suprafață (07.08.1945), utilizarea hidrogenului în scufundări este abandonată până la mijlocul anilor ’60 când cercetările privind utilizarea acestui gaz în amestecuri respiratorii sunt reluate. Studiile de laborator s-au desfășurat pe animale ce au respirat timp de 24 de ore amestec hidrogen-oxigen la o presiune de 70 atm. O concluzie interesantă a acestor studii s-a referit la faptul că hidrogenul reduce „Sindromul Nervos de Înaltă Presiune” (SNIP) observat adesea în cazul scufundărilor de adâncime cu amestecuri conținând heliu.

1.3.6 Neonul din amestecurile respiratorii

Pentru formarea amestecurilor respiratorii, experimental, a mai fost folosit pentru diluarea oxigenului, neonul. Acest gaz a fost descoperit de Ramsay și Rayleigh în anul 1898.

Neonul este un gaz rar, incolor, monoatomic, cu masa atomică 20,183 a cărui strat electronic exterior are structura $1s^2 2s^2 2p^6$. Acesta, așa cum este prezentat în tabelul 1.1, se găsește în aerul atmosferic împreună cu celelalte gaze rare, conținutul în neon fiind de $1,8 \cdot 10^{-3}$ % vol. Punctul de fierbere este – 246,03°C, iar punctul de topire – 248,6°C. Obținerea lui se realizează utilizând procesul de separare pe cărbune activ. Neonul este izolat din fracțiunea rămasă necondensată în procesul de lichefiere a aerului atmosferic unde se găsește împreună cu heliul.

Folosit ca gaz respirator, neonul provoacă distorsiuni ale vocii mai mici decât heliul. De asemenea, are conductivitate termică mai redusă ca acesta. Utilizarea lui în amestecuri respiratorii duce însă la creșterea costurilor, el fiind un gaz scump. De asemenea, un alt dezavantaj în constituie rezistența la respirație crescută în cazul sarcinilor de lucru moderate sau grele.

1.3.7 Argonul din amestecurile respiratorii

Argonul este un element chimic ce face parte din grupa gazelor rare. A fost descoperit în anul 1894 de Rayleigh și Ramsay. Este un gaz incolor, cu molecula monoatomică. Are masa atomică 39,948, punctul de fierbere - 185,7°C, iar punctul de topire -189,3°C. Stratul exterior are configurația electronică $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$. În laborator acesta se folosește pentru realizarea unei atmosfere inerte.

În raport cu organismul uman, argonul are proprietăți narcotice. De asemenea, densitatea acestuia îl face impropriu pentru utilizarea sa în procesul respirator. Datorită densității sale mai mari ce duce la un transfer termic redus, în domeniul scufundărilor argonul se utilizează pentru umflarea costumelor uscate cu volum variabil.

1.3.8 Dioxidul de carbon

În mediul înconjurător, dioxidul de carbon este, în principal, rezultat ca urmarea a diverselor procese de oxidare desfășurate. Rezultă în urma arderii complete a carbonului. Este un gaz incolor, inodor, mai greu decât aerul, nu arde și nu întreține arderea.

Acest gaz este un subprodus al metabolismului și este eliminat din corp prin respirație. Deși nu este considerat a fi toxic, prezența dioxidului de carbon în concentrații ridicate poate provoca pierderea conștienței, fapt ce poate fi fatal pentru scafandri. Problemele majore privind dioxidul de carbon sunt legate de controlul cantității prezente în dispozitivul de respirat și eliminarea acestuia după exhalare. Prezența dioxidului de carbon la concentrații ridicate poate crea

predispoziție către narcoză cu azot, toxicitate a oxigenului și probleme de decompresie. Dioxidul de carbon este considerat activ din punct de vedere biologic din momentul în care influențează în mod direct nivelul de pH al sângelui. Rezultatele studiilor medicale arată că există o corelare între dioxidul de carbon și dilatarea vaselor sangvine. Astfel, la utilizarea aparatelor de respirat sub apă în circuit închis sau semi-închis, eliminarea dioxidului de carbon din amestecul respirator este un aspect de maximă importanță.

1.3.9 Monoxidul de carbon

Monoxidul de carbon este un gaz asfixiant, toxic, insipid, incolor și inodor. Valoarea densității este de 1,2506 kg/m^3 (0 C), masa molară 28,07 g/mol, punctul de topire −205,07^{o}C și punctul de fierbere – 191,55^{o}C, iar solubilitatea în apă este 30 mg/l (20^{o}C). Apariția monoxidului de carbon se produce în urma arderii, oxidării incomplete a substanțelor cu conținut de carbon, produsă la temperaturi înalte, în locuri sărace în oxigen.

Influența lui asupra organismului uman se manifestă prin diminuarea capacității sângelui de a transporta oxigenul fapt ce se soldează cu asfixierea subiectului.

Fiind rezultate în urma arderilor incomplete ce pot avea loc în motoare cu combustie internă sau în cazul supraîncălzirii compresoarelor răcite cu ulei, prezența monoxidului de carbon în organismul uman poate să se producă, în cazul scufundărilor, prin intermediul sursei de aer. Aceasta se poate contamina ca urmare a amplasării deschiderii de admisie a compresorului prea aproape de evacuarea ansamblului compresor-motor.

1.4 AMESTECURI RESPIRATORII FOLOSITE ÎN PROCESELE HIPERBARE CU APLICAȚII ÎN DOMENIUL SCUFUNDĂRILOR

Amestecurile respiratorii sunt amestecuri gazoase cu două sau trei componente, o componentă fiind oxigenul, iar celelalte componente fiind gazele inerte.

Aceste amestecuri se realizează prin combinarea oxigenului cu unul sau două gaze inerte, fiecare în proporția dorită. Așadar, după numărul de componente ce formează amestecul, se disting amestecuri binare, alcătuite din două componente și amestecuri ternare formate din trei componente. Rolul gazelor inerte în amestecul respirator este de a contracara efectele neurotoxice ale oxigenului.

Cele mai utilizate gaze inerte folosite în vederea preparării de amestecuri respiratorii sunt azotul și heliul. Prin utilizarea lor pentru diluarea oxigenului, se realizează amestecurile binare cunoscute sub denumirea de NITROX (oxigen și azot) respectiv HELIOX (oxigen și heliu). Pentru fabricarea amestecurile ternare, gazele inerte folosite cel mai des sunt heliul și azotul, formându-se astfel în combinație cu oxigenul amestecul respirator cunoscut ca TRIMIX.

Principalele caracteristici fizice ale celor trei gaze pure folosite pentru realizarea amestecurilor respiratorii, sunt prezentate în tabelul 1.8.

Cele trei amestecuri respiratorii menționate anterior sunt utilizate la ora actuală, în mod frecvent, pentru scufundările unitare și pentru scufundările în saturație. Deși controversate din punct de vedere al siguranței scafandrului, în cazul scufundărilor de mică adâncime, se folosesc cu precădere amestecurile de oxigen îmbogățit. Problemele de care trebuie să se țină cont în cazul folosirii oricăror amestecuri de gaze sunt legate de puritatea gazelor amestecului, raporturile dintre componente, efectul oxigenului asupra organismului uman când acesta este respirat la presiuni mult mai mari decât presiunea atmosferică și procedura de decompresie la revenirea scafandrului la suprafață.

Tabelul 1.8 Caracteristicile fizice ale principalelor gaze componente folosite la fabricarea amestecurilor respiratorii

Gaz	$\mathcal{M}$	R	c_p	c_v
	[kg/(kmol)]	[J/(kgK)]	[J/(kgK)]	[J/(kgK)]
Oxigen	31,999	260	919	659
Azot	28,013	297	1040	743
Heliu	4,002	2079	5234	3155

În afara heliului și azotului se mai folosește și hidrogenul, rezultând, prin amestecarea cu oxigen, amestecul denumit HIDROX. În decursul timpului s-au efectuat cercetări experimentale și cu alte gaze precum argonul și neonul. Acestea din urmă nu și-au găsit însă utilizarea practică. Testele derulate asupra folosirii gazelor diluante ale oxigenului, dintre care hidrogenul, neonul, argonul și heliul, au dus la rezultate satisfăcătoare numai în cazul heliului și hidrogenului. În cadrul experimentărilor de laborator, se mai utilizează și amestecuri ternare hidrogen-heliu-oxigen (HIDRELIOX).

Amestecul respirator folosit însă cel mai mult în domeniul scufundărilor de mică adâncime a fost, este și va rămâne aerul atmosferic comprimat. Datorită inconvenientelor legate de respirarea lui la presiuni ridicate, și anume peste circa 5 bar (sc. abs.), s-a recurs la înlocuirea azotului cu alte gaze inerte, cel mai adesea cu heliu sau hidrogen.

Din punct de vedere al conținutului de oxigen, amestecurile respiratorii folosite pentru scufundările autonome sunt standardizate. În literatura de specialitate, sunt precizate concentrațiile oxigenului pentru amestecurile respiratorii frecvent utilizate și anume: 30% (32% sau 32,5%), 40%, 50% și 60%. Participațiile volumice ale oxigenului în amestec, r_{O_2}, sunt așadar 0,30 (0,32 sau 0,325); 0,40; 0,50 și 0,60. În cazul amestecului HIDROX s-au efectuat studii experimentale în care participațiile volumice ale oxigenului au fost mai mici, de $r_{O_2} < 0{,}04$.

1.4.1 Amestecul respirator binar NITROX

Amestecurile NITROX pot fi realizate în diverse proporții, raportul dintre cele două componente fiind dat de adâncimea de scufundare și, ca o consecință, de presiunile parțiale ale celor două gaze. Raporturile dintre cei doi constituenți ai amestecului se pot încadra, conform U.S. Navy Diving Manual, în intervalul 75% azot/ 25% oxigen - 60% azot/ 40% oxigen, adică amestecuri NITROX în intervalul 75/25 – 60/40.

În tabelul 1.9, sunt prezentate caracteristicile fizice ce corespund unor amestecuri respiratorii, binare NITROX.

Tabelul 1.9 Caracteristicile fizice ale amestecului respirator NITROX

Amestec NITROX	r_{Ox}	r_{Ni}	$\mathcal{M}_{Ox}$	$\mathcal{M}_{Ni}$	$\mathcal{M}_{NiOx}$	R_{NiOx}	$c_{p,NiOx}$	$c_{v,NiOx}$
O_x[%]/ N_i[%]	[-]	[-]	[kg/ kmol]	[kg/ kmol]	[kg/ kmol]	[J/(kgK)]	[J/(kgK)]	[J/(kgK)]
30/70	0,30	0,70	31,999	28,013	29,208	284,650	1000,232	715,392
32/68	0,32	0,68	31,999	28,013	29,288	283,875	997,696	713,632
32,5/ 67,5	0,325	0,675	31,999	28,013	29,308	283,682	997,064	713,193
40/60	0,40	0,60	31,999	28,013	29,607	280,818	987,690	706,685
50/50	0,50	0,50	31,999	28,013	30,006	277,087	975,481	698,210
60/40	0,60	0,40	31,999	28,013	30,404	273,455	963,592	689,957

În comparație cu utilizarea aerului ca gaz respirator, amestecul NITROX supaoxigenat conduce la timpi de imersie mai mari, eliminând sau reducând perioada necesară procedurilor de decompresie. Acest amestec poate fi folosit în orice operație de scufundare pentru care se folosește aerul, limita sa de utilizare fiind de circa 40 m (coloană apă de mare). De obicei, scufundările cu NITROX sunt operațiuni efectuate la adâncimi mici. Beneficiile majore ale acestui amestec sunt obținute până la adâncimi de 15 m, dar folosirea lui poate fi considerată avantajoasă până la 40 m.

În cazul scufundărilor de adâncime medie, unitare și în saturație, amestecurile NITROX cu un conținut de oxigen mai mic de 21% asigură o protecție ridicată în ceea ce privește toxicitatea, hiperoxia putând apărea chiar de la un procent de oxigen de 15%. În ceea ce privește efectul nociv al azotului, manifestat prin apariția narcozei, acesta poate fi evitat, de asemenea, prin adoptarea unor proceduri de scufundare atent planificate. Astfel, fie că este vorba de amestecuri NITROX sărace sau îmbogățite cu oxigen efectul celor două gaze ce intră în compoziția amestecului respirator poate provoca fie narcoza fie hiperoxia ce poate duce la intoxicarea cu oxigen.

Cerințele de decompresie în cazul amestecurilor NITROX îmbogățite cu oxigen sunt mai puțin severe decât în cazul aerului, aceasta datorită faptului că azotul este redus sub 79%.

Până în momentul de față, au fost efectuate numeroase studii utile în stabilirea strategiilor de scufundare cu amestec respirator NITROX îmbogățit cu oxigen.

U.S. Navy Diving Manual evidențiază avantajele și dezavantajele utilizării amestecului NITROX îmbogățit cu oxigen (supraoxigenate) în comparație cu folosirea aerului.

Avantaje:

- timpi de imersie crescuți în cazul scufundărilor fără decompresie;
- reducerea timpului de decompresie;
- prezența în organism a azotului rezidual în cantități mici;
- diminuarea posibilității apariției bolilor rezultate ca urmare a decompresiei;
- reducerea narcozei datorată azotului.

Dezavantaje:

- creșterea riscului de intoxicare al sistemului nervos central cu oxigen;
- necesitatea unor echipamente speciale pentru fabricarea amestecului NITROX;
- aplicarea unor tehnici speciale pentru curățarea echipamentelor utilizate;
- scufundările de lungă durată ce utilizează NITROX ca amestec respirator pot duce la intoxicații pulmonare cu oxigen;
- utilizarea sistemelor NITROX necesită o pregătire de specialitate;
- amestecul NITROX este scump.

1.4.2 Amestecul respirator binar HELIOX

Efectul narcotic al azotului, manifestat încă de la adâncimi relativ mici, a impus găsirea unui înlocuitor al acestuia cu alt gaz inert ce poate fi folosit și la adâncimi mai mari. În urma testelor efectuate privind efectul narcotic și solubilitatea, s-a ajuns la concluzia că heliul are efectul narcotic cel mai redus, fiind de patru ori mai puțin nociv decât azotul.

Scufundările în saturație și cele unitare de mare adâncime efectuate de US Navy cu amestecul HELIOX au atins adâncimi de peste 300 m. Pentru acest tip de scufundări, deși costurile de realizarea ale amestecului respirator sunt foarte mari, amestecul HELIOX este cel mai utilizat. Caracterisiticile fizice ale acestui amestec binar, ce corespund unor variante de realizare, sunt date în tabelul 1.10.

În comparație cu azotul, pentru anumite compartimente de țesuturi (conform teoriei fiziologului englez J.S. Haldane), timpul de semisaturație a țesuturilor pentru heliu este de circa 2,7 ori mai mare decât cel al azotului.

Procedeele de calcul folosite pentru scufundarea cu azot pot fi transpuse heliului, pentru aceasta trebuind ca pentru timpii de semisaturație să se țină cont de valoarea de 2,7.

Când se efectuează scufundări cu HELIOX, în special de mare adâncime și expunere la presiuni crescute pe perioade îndelungate, pentru a optimiza procedura de decompresie este recomandat să se treacă, către suprafață la amestecul NITROX în faza de revenire la suprafață.

Cu cât saturarea cu heliu a compartimentelor de țesuturi cu saturație lentă este mai mare, cu atât mai mare va fi și timpul de trecere la un mediu respirator cu azot. Creșterea progresivă a presiunii parțiale a azotului sporește eliminarea heliului, dar totodată diminuează absorbția de azot în compartimentele respective. În mod similar, creșterea presiunii parțiale a oxigenului înlesnește eliminarea tuturor gazelor inerte, dar totodată poate genera hiperoxie.

Tabelul 1.10 Caracteristicile fizice ale amestecului binar HELIOX, în cazul unor variante de realizare

Amestec HELIOX	r_{Ox}	r_{He}	$\mathcal{M}_{Ox}$	$\mathcal{M}_{He}$	$\mathcal{M}_{HeOx}$	R_{HeOx}	$c_{p,HeOx}$	$c_{v,HeOx}$
Ox[%]/ He [%]	[-]	[-]	[kg/ kmol]	[kg/ kmol]	[kg/ kmol]	[J/ (kgK)]	[J/ (kgK)]	[J/ (kgK)]
0,9/99,1	0,009	0,991	31,999	4,002	4,25	1957	4946	2989
2/98	0,02	0,98	31,999	4,002	4,56	1824	4630	2806
5/95*	0,05	0,95	31,999	4,002	5,40	1540	3957	2417
5,5/94,5	0,055	0,945	31,999	4,002	5,54	1501	3864	2363
10/90	0,10	0,90	31,999	4,002	6,80	1223	3204	1981
12/88	0,12	0,88	31,999	4,002	7,36	1130	2984	1854
15/85	0,15	0,85	31,999	4,002	8,20	1014	2709	1695
18/82	0,18	0,82	31,999	4,002	9,04	920	2485	1565
23/77	0,23	0,77	31,999	4,002	10,44	797	2193	1396

Utilizarea amestecului HELIOX duce la modificări ale vocii fapt ce îngreunează comunicarea între persoanele din echipă. În acest caz, sunt folosite dispozitive electronice pentru corectarea distorsiunilor vocale.

O problemă majoră legată de utilizarea heliului în amestecurile respiratorii îl constituie puterea de penetrare a acestuia, fapt ce duce adesea la distrugerea aparatelor de măsură și a dispozitivelor electronice, lucru care nu se petrece în cazul azotului. Deși heliul rămâne o alternativă viabilă pentru scufundările de adâncime, azotul facilitează decompresia, îmbunătățește problemele privind distorsiunea vocii și asigură un confort termic scafandrului.

1.4.3 Amestecul respirator binar HIDROX

Deoarece hidrogenul este cel mai ușor gaz, se poate presupune că asigură o rezistență scăzută la respirație. Acest fapt asigură un transfer de

oxigen și dioxid de carbon rapid în organism când acesta se află supus la presiuni ridicate.

Având în vedere solubilitatea și difuzivitatea hidrogenului, rata sa de absorbție și de eliminare în și din sânge și țesuturi ar trebui să fie mai mare decât în cazul azotului și chiar și a heliului. În realitate însă performanțele acestuia ca gaz respirator îl plasează între azot și heliu.

În ciuda oricăror avantaje potențiale ale amestecurilor respiratorii formate din hidrogen și oxigen, din cauza proprietăților explozive și a naturii inflamabile, scafandrii au evitat, în general, experimentarea acestui tip de amestecuri. La începutul anilor 1950 o serie de studii au stabilit că un procent de oxigen situat sub valoarea de 3% - 4% asigură limita de siguranță în ceea ce privește caracterul inflamabil și explozibil al acestui gaz. Un amestec în raport de 97/3 hidrogen/ oxigen poate fi utilizat la adâncimi sub 60 m, la care presiunea parțială a oxigenului este egală cu presiunea parțială la nivelul mării. Experimentele de laborator pe animale mici au arătat, de asemenea, că potențialul narcotic al hidrogenului este mai mic decât cel al azotului, dar mai mare ca cel al heliului. Spre deosebire de heliu, hidrogenul este relativ accesibil și necostisitor.

1.4.4 Amestecul respirator ternar TRIMIX

Scufundările sub 400 m cu amestec HELIOX nu prezintă doar inconveniente de ordin practic, dar și din cel al riscurilor asumate. Sindromul nervos al înaltelor presiuni (S.N.I.P.) este o problemă majoră la scufundările de mare adâncime cu HELIOX. Pentru ameliorarea acestuia în amestecurile pe bază de heliu-oxigen se injectează azot în proporție de 5...10% (r_{N_2} = 0,05...0,1). Amestecul astfel format este unul ternar, denumit TRIMIX.

Amestecul TRIMIX este util pentru scufundări variind între 150 m și 600 m. Din cauza efectului narcotic, procentul de azot din amestec este, așa cum s-a menționat și anterior, sub 10 %.

Tehnicile de decompresie în cazul utilizării amestecului TRIMIX sunt cele obișnuite. Absorbția și eliminarea atât a heliului cât și a azotului poate fi limitată de tensiunile critice. Prin utilizarea unui set de date privind timpul de semisaturație și tensiunile critice și un set de date cu timpii de semisaturație corespunzători heliului, care sunt de aproximativ trei ori mai mici decât în cazul azotului pentru același compartiment de țesuturi, absorbția și eliminarea gazului inert poate fi considerată ca suma fracțiilor de azot și heliu din amestecul TRIMIX. Pentru aceasta se folosesc expresiile exponențiale uzuale pentru fiecare componentă de gaz inert. Astfel de abordări pentru decompresia scafandrilor, în urma folosirii amestecului TRIMIX, au fost testate în cadrul a numeroase experimente.

1.5 EFECTELE OXIGENULUI DIN AMESTECURILE RESPIRATORII

Limitele impuse de oxigen în scufundare, au fost determinate experimental și sunt prezentate grafic în figura 1.1.

Pe abscisă este reprezentată adâncimea de scufundare, în metri și presiunea corespunzătoare adâncimii, în bar (sc. abs.), iar pe ordonată, concentrația oxigenului (%O_2) și concentrația gazului inert (% gaz inert) în amestec. Curba I reunește punctele a căror presiune parțială a oxigenului este p_{O_2} = 0,17 bar (sc. abs.), curba II punctele a căror presiune parțială a oxigenului este p_{O_2} = 2 bar (sc. abs.), iar curba reprezentată cu linie întreruptă punctele a căror presiune parțială a oxigenului este p_{O_2} = 0,21 bar (sc. abs.). Curba I reprezintă curba limită inferioară a zonei de securitate, sub această curbă existând zona de hipoxie și anoxie, curba II reprezintă curba limită superioară a zonei de securitate, peste această curbă existând zona de hiperoxie, iar curba desenată cu linie întreruptă este curba de normoxie corespunzătoare unei presiuni parțiale a oxigenului p_{O_2} = 0,21 bar (sc. abs.) egală cu cea a oxigenului din aerul la presiunea atmosferică. Înainte de a face comentarii asupra graficului din figura 1.1 este necesar să se precizeze importanța factorului timp în apariția accidentelor datorate deficitului de oxigen (hipoxie) și lipsei de oxigen (anoxie) sau presiunii în exces a acestuia (hiperoxie).

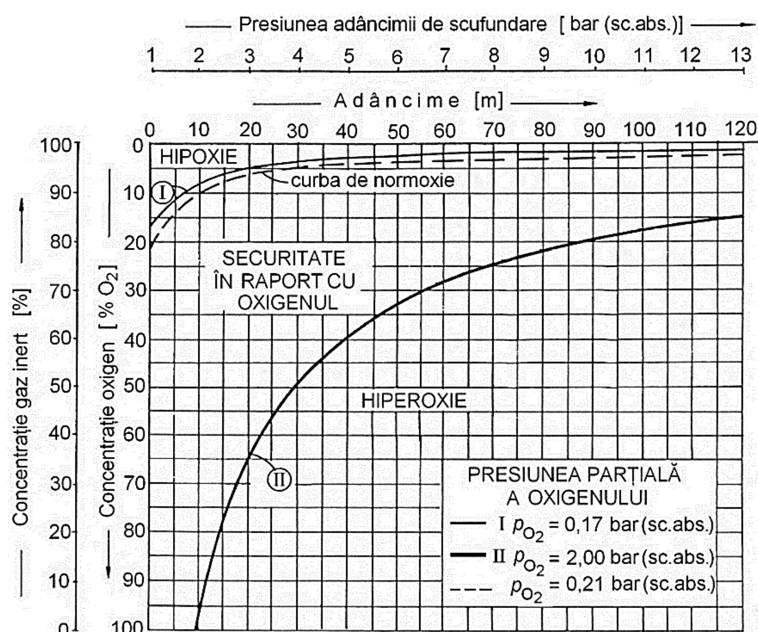


Figura 1.1 Reprezentarea grafică a limitelor impuse pentru oxigen în amestecurile respiratorii

Respirând un amestec cu presiunea parțială a oxigenului sub valoarea corespunzătoare curbei I (p_{O_2} < 0,17 bar (sc. abs.)) se riscă o sincopă hipoxică sau anoxică, ce apare fără nici un semnal de avertizare. Timpul de

latență este 1…2 minute, funcție de activitatea desfășurată sub apă. Pot apărea însă semnale de alarmă în zona presiunilor parțiale ale oxigenului cuprinse între 0,17 bar (sc. abs.) și 0,1 bar (sc. abs.), dar aceste semnale nu sunt întotdeauna percepute de scafandri și deci, nu se poate pune bază pe acestea ca elemente de stabilire a începutului unei crize de hipoxie.

În continuare, se prezintă efectele presiunii parțiale a oxigenului, p_{O_2}, în cazul hipoxiei:

- p_{O_2} < 0,17 bar (sc. abs.): pulsul și frecvența respirației cresc, atenția scade, mișcările delicate diminuează;
- $p_{O_2} \leq$ 0,1 bar (sc. abs.): judecată eronată, insensibilitate, oboseală, apariția cianozei;
- p_{O_2} = 0,06…0,07 bar (sc. abs.): greață, vomă, imposibilitate de efort, cianoză intensă;
- p_{O_2} < 0,06 bar (sc. abs.): respirație neregulată, convulsii, sincopă, moarte.

Respirând un amestec cu presiunea parțială a oxigenului peste valoarea corespunzătoare curbei II (p_{O_2} > 2 bar (sc. abs.)) se riscă o criză convulsivă de tip hiperoxic. Această criză nu apare imediat ce s-a depășit pragul critic, ea producându-se dacă expunerea se prelungește peste anumite limite de timp, care definesc latența fenomenului. Latența variază de la individ la individ sau chiar la același individ funcție de efortul depus, frig, oboseală etc. După U.S. Navy Diving Manual, timpii de latență la respirarea oxigenului pur, sunt:

- 7 ore la 7 metri adâncime (p_{O_2} = 1,7 bar (sc. abs.));
- 3 ore la 8 metri (= 1,8 bar (sc. abs.));
- 50 minute la 10 metri (p_{O_2} = 2 bar (sc. abs.));
- 30 minute la 20 metri (p_{O_2} = 3 bar (sc. abs.));
- 10 minute la 25 metri (= 3,5 bar (sc. abs.)).

Activitatea în mediul marin scurtează timpul de latență. Astfel, pentru adâncimea de 18 m, în incinte hiperbare uscate (barocamere), timpul de latență poate ajunge până la 2 ore, iar în mediul marin el este de numai 40 minute. Pentru exemplificare, în figura 1.2 se prezintă curbele aproximative ale timpilor de latență ce preced criza convulsivă neurotoxică, funcție de adâncime, pentru cazul în care se respiră oxigen pur.

Variațiile individuale ale timpului de latență sunt, de asemenea, foarte întinse și imprevizibile. La același individ, timpul de latență poate fi cuprins între 7 minute și 2,5 ore. Semnele de alarmă iau aspectul unor mici crize foarte localizate, cu durată scurtă, grețuri, indispoziții, tremur al buzelor sau mușchilor feței, crampe musculare, jenă respiratorie, accelerarea pulsului și palpitații. Apoi, totul reintră în normal până la o nouă criză respiratorie. Astfel, pot apărea mai multe crize mici până la marea criză convulsivă. Acest efect neurotoxic al oxigenului a fost descris

pentru prima dată de Paul Bert în anul 1878. Câțiva ani mai tărziu, în 1899, Lorrain Smith a arătat că oxigenul inhalat în mod continuu și timp îndelungat, provoacă leziuni pulmonare chiar și la presiunea atmosferică. Primul efect, efectul Paul Bert, interesează scafandrii autonomi ce folosesc aparate cu oxigen pur sau cu amestecuri supraoxigenate, iar cel de-al doilea efect, efectul Lorrain Smith, interesează scafandrii ce staționează timp îndelungat în incinte hiperbare supraoxigenate, cum este cazul scafandrilor aflați în saturație, sau al tratamentelor prin oxigenoterapie hiperbară.

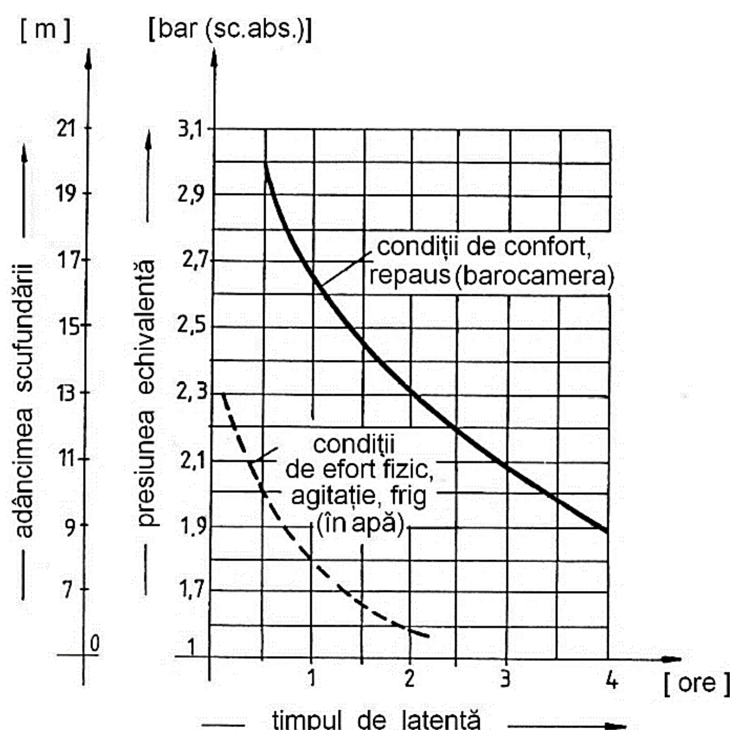


Figura 1.2 Curbele aproximative ale timpilor de latență ce preced criza convulsivă neurotoxică, funcție de adâncimea scufundării (sau de presiunea echivalentă)

Limitele de securitate pentru utilizarea oxigenului pur, recomandate în urma experimentărilor sunt:

- în scufundări unitare reale: 6,5...7 m adâncime (p_{O_2} = 1,65…1,7 bar (sc. abs.));
- la paliere de decompresie în apă: 6 m adâncime (p_{O_2} = 1,6 bar (sc. abs.));
- la paliere de decompresie în turele de scufundare sau în barocamere: 12 m adâncime (p_{O_2} = 2,2 bar (sc. abs.));
- în tratamentul accidentelor de scufundare: 9 m adâncime (p_{O_2} = 1,9 bar (sc. abs.)); în acest caz, cea mai bună combinație este 25 minute oxigen și 5 minute aer sau alt amestec oxigen-gaz inert;

- la testele de aptitudine în stabilirea toleranței la oxigenul hiperbar: 18 m adâncime (p_{O_2} = 2,8 bar (sc. abs.)); la scafandri de luptă, cei mai expuși dintre scafandri la hiperoxie, se recomandă ca testul să se efectueze la adâncimea de 20 m (p_{O_2} = 3 bar (sc. abs.)) cu urmărirea răspunsului pe electroencefalogramă.

În cazul scufundărilor cu amestecuri respiratorii sintetice sau cu aer, presiunea parțială a oxigenului se va menține în limitele maxime admisibile de 1,2...1,6 bar (sc. abs.). Cu alte cuvinte, aerul atmosferic poate fi folosit, din punct de vedere al toxicității oxigenului, în condiții de securitate deplină până la adâncimea de 75 m. În realitate, la scufundarea cu aer, această adâncime nu poate fi atinsă decât de profesioniști antrenați, datorită limitei impuse de narcoza cu azot (50...60 m). După unii autori, pentru durată limitată, presiunea parțială a oxigenului de 2 bar (sc. abs.) într-un amestec respirator este foarte bine suportată de scafandri.

Pentru scafandrii militari, de incursiune și deminori, care utilizează de obicei aparate de respirat sub apă cu circuit închis cu oxigen pur sau aparate de respirat sub apă cu circuit semiînchis cu amestec NITROX, au fost propuse o serie de limite de timp practice privind utilizarea oxigenului pur sau a amestecului binar NITROX de către U. S. Navy sau de către **NOAA** (**N**ational **O**ceanic and **A**tmospheric **A**dministration). Aceste valori limită de expunere funcție de presiunea parțială a oxigenului p_{O_2} sunt prezentate comparativ în tabelul 1.11.

Din prezentarea comparativă a limitelor de timp privind expunerea la oxigen a scafandrilor militari autonomi respirând oxigen pur sau amestecuri NITROX (tabelul 1.11), rezultă diferențele importante între valorile impuse de diferitele școli și deci marele grad de incertitudine inerentă studiilor privind expunerea scafandrului la oxigen.

În cazul scufundărilor care necesită staționarea îndelungată a scafandrilor într-o ambianță cu presiunea parțială a oxigenului ridicată, problema se pune diferit, ținând cont de *efectul Lorrain Smith*. Intoxicația pulmonară a oxigenului descrisă de Lorrain Smith în 1897 sub numele de *pneumonie cauzată de oxigen* trece foarte rapid prin mai multe faze de gravitate până la edem pulmonar. Aceasta este o intoxicație cronică ale cărei prime simptome, absolut benigne, nu apar decât după un interval de timp mai mare și la o presiune parțială a oxigenului de peste 0,5 bar (sc. abs.). Spre exemplu, pentru un scafandru care respiră oxigen pur (r_{O_2} = 1) la adâncimea de 10 m ($p_{O_2} =$ 2 bar (sc. abs.)) evoluția semnelor și simptomelor *pneumoniei* este următoarea:

- după aproximativ 4 ore: jenă respiratorie;
- după aproximativ 6 ore: jenă respiratorie netă și tuse;
- după aproximativ 8 ore: arsuri retrosternale;
- după aproximativ 9 ore: arsuri și tuse cu frecvență mărită.

În anul 1971 Clark și Lambertsen au propus cuantificarea dozei de toxicitate a oxigenului respirat cu ajutorul unei unități toxice cumulative **UPTD** (**U**nit **P**ulmonary **T**oxicity **D**ose):

Tabelul 1.11 Valori limită ale timpului de expunere a scafandrului la diferitele presiuni parțiale ale oxigenului în cazul scufundărilor autonome cu oxigen pur și cu amestec NITROX

Limitele de utilizare a oxigenului pur U.S.Navy			**Limitele de utilizare a amestecului NITROX U.S.Navy**		**Limitele de expunere pentru scufundări cu amestec NITROX NOAA**		
p_{O_2} [bar (abs.)]	Adâncime [m]	Durata maximă [min]	p_{O_2} [bar (abs.)]	Durata maximă [min]	p_{O_2} [bar (abs.)]	Durata maximă pentru o singură scufundare pe zi [min]	Durata maximă pentru mai multe scufundări pe zi [min]
Expuneri normale							
					0,6	720	720
					0,7	570	570
					0,8	450	450
					0,9	360	360
			1,0	240	1,0	300	300
			1,1	120	1,1	240	270
			1,2	80	1,2	210	240
1,3	3	240	1,3	60	1,3	180	210
			1,4	50	1,4	150	180
1,45	4,5	120					
			1,5	40	1,5	120	180
			1,6	30	1,6	45	150
1,7	7	90					
1,85	8,5	65					
Expuneri excepționale							
			1,3	240	1,3	240	
			1,4	180	1,4	180	
			1,5	120	1,5	150	
			1,6	100	1,6	120	
			1,7	80	1,7	75	
			1,8	60	1,8	60	
1,9	9	45					
2,05	10,5	34					
2,2	12	25					
2,35	13,5	15					

$$\text{UPTD} = \sqrt[-1,2]{\frac{0,5}{p_{O_2} - 0,5}}\, t = t\,(2 \cdot p_{O_2} - 1)^{0,833} \qquad (1.32)$$

unde: t este timpul de expunere la oxigenul hiperbar (min) iar p_{O_2} presiunea parțială a oxigenului din amestecul respirator (bar (sc. abs.)).

Trebuie menționat faptul că în cazul utilizării oxigenului pur, presiunea parțială a oxigenului este chiar presiunea totală a gazului pur.

Clark și Lambertsen au demonstrat că oxigenul hiperbar are influență asupra capacității vitale micșorând-o, la 50% din subiecți, cu până la 20%, funcție de timpul de expunere. Variația capacității vitale funcție de UPTD este prezentată în tabelul 1.12.

În cazul scufundărilor în saturație cu un UPTD = 1900...2200, nu apar modificări semnificative ale capacității vitale, doza fiind considerată ca admisibilă.

Relația stabilită de Clark și Lambertsen este satisfăcătoare când presiunea parțială a oxigenului, p_{O_2}, este constantă și depășește 1 bar (sc. abs.) (*Lemaire*, 1977).

Tabelul 1.12 Variația capacității vitale la 50% din subiecți, funcție de UPTD (după Clark, 1970)

UPTD	**Variația capacității vitale** [%]
615	-2
825	-4
1035	-6
1230	-8
1425	-10
1815	-15
2190	-20

Pentru expuneri la valori variabile ale presiunii parțiale a oxigenului, fie expuneri cu întreruperi, fie expuneri de nivel scăzut cuprinse între 0,5 și 0,8 bar (sc. abs.), dar pentru durate lungi, cuantificarea propusă de Clark și Lambertsen nu este cea mai concludentă, afirmație demonstrată pentru scufundări în saturație cu p_{O_2} de 0,6 bar (sc. abs.) timp de 5 până la 6 zile, ceea ce au corespuns unui UPTD de 1900 până la 2200 unități fără ca să apară la scafandri modificări ale capacității vitale (*Sciarli* și *Lemaire*, 1975).

Ținând cont de variațiile capacității vitale, de simptomele apărute și de faptul că în timpul decompresiei presiunea parțială a oxigenului este destul de aproape de limita toxică, 0,6 bar (sc. abs.), sau de faptul că aceasta poate varia, școala franceză de scufundare a renunțat la cuantificarea lui Clark și Lambertsen. După Lemaire (1977), cuantificarea dozei de toxicitate a oxigenului respirat se determină cu formula:

$$U_2 = (p_{O_2})^2 t \tag{1.33}$$

unde: t este timpul de expunere la oxigenul hiperbar (min) iar p_{O_2} presiunea parțială a oxigenului din amestecul respirator (bar (sc. abs.)).

Determinarea efectului toxic cumulativ al oxigenului nu se poate face decât dacă presiunea lui parțială depășește 0,5 bar (sc. abs.). Pe timpul expunerilor la amestecuri supraoxigenate, după Lemaire (1977), se pot atinge valori de 30 U_2 până la 36 U_2, funcție de subiecți, fără să apară diminuarea capacității vitale sau a simptomelor specifice pneumoniei.

Revenind la limitele de securitate ale presiunii parțiale a oxigenului, în cazul scufundărilor cu expuneri de lungă durată, în ambianță hiperbară, se poate preciza:

- presiunea parțială a oxigenului la nivelul de viață: 300...400 mbar (sc. abs.), adică 0,3...0,45 bar (sc. abs.);
- presiunea parțială a oxigenului pe timpul decompresiei: mai mare de 500 mbar (sc. abs.), adică 0,5 bar (sc. abs.), dar astfel încât să nu se depășească doza de toxicitate.

Experiențele efectuate în cadrul Laboratorului Hiperbar din cadrul Centrului de Scafandri Constanța au pus în evidență modificări ale capacității vitale pulmonare la diferitele doze cumulative de oxigen hiperbar (UPTD).

Datele obținute în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța confirmă faptul că la aproximativ 50% din numărul subiecților apare o reducere a capacității vitale pulmonare de până la 20%. Capacitatea vitală suferă modificări și la doze cumulative de oxigen hiperbar reduse, iar la doze mai mari modificările sunt mai mici decât cele constatate în gama 500...1500 unități UPTD. Acest fapt se poate pune pe seama unei adaptabilități la oxigenul hiperbar, adaptabilitate dovedită prin experimentările efectuate pe animale. Acesta este motivul pentru care echipa Laboratorului Hiperbar din Constanța a analizat datele obținute în încercarea de a răspunde la două probleme privind:

- influența gazului inert folosit ca diluant al oxigenului din amestecul respirat în condiții hiperbare;
- influența reducerii capacității vitale pulmonare la scafandri pe timpul revenirii la presiunea atmosferică.

Referitor la influența reducerii capacității vitale pulmonare a scafandrilor pe timpul revenirii la presiunea atmosferică, s-au corelat rezultatele obținute cu incidența accidentelor de decompresie. S-a constatat că au apărut accidente de decompresie numai la subiecții care au suferit diminuări ale capacității vitale.

Cauzele accidentelor de decompresie se pun pe seama reducerii transportului de gaze inerte dizolvate în țesuturile organismului la expunerea în mediul hiperbar, dinspre țesuturi spre exterior prin aparatul respirator, pe timpul revenirii la presiunea atmosferică, datorate efectului presiunii parțiale ridicate a oxigenului din amestecurile respiratorii asupra capacității vitale. Sensibilitatea subiecților la oxigen hiperbar poate fi o inaptitudine de scufundare, dar există și posibilitatea "antrenării" organismului pentru creșterea rezistenței la efectele acestuia.

Pentru diminuarea efectelor oxigenului hiperbar s-au încercat, în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța, metode noi de abordare a problemei, făcându-se experimentări pe șobolani Wistar cu expuneri, în prealabil, la hipoxie urmate de expuneri la hiperoxie. Rezultatele experimentărilor au demonstrat o creștere a toleranței la oxigenul hiperbar, ceea ce a condus la ideea necesității efectuării unor recuperări fizice pentru scafandri în stațiuni montane cu altitudini până la 2000 m. Aceasta le conferă o creștere a toleranței la oxigenul hiperbar și, implicit, o diminuare a modificărilor capacității lor vitale pe timpul expunerilor de lungă sau de scurtă durată în ambianțe hiperbare cu presiuni parțiale de oxigen ridicate.

Din cele prezentate mai sus se poate constata o tendință spre creșterea presiunii parțiale a oxigenului în amestecurile respiratorii către limitele maxime admisibile. Se pune, în mod firesc, întrebarea: de ce ar fi de dorit presiuni parțiale (concentrații) mari de oxigen în amestecurile respiratorii utilizate pentru scufundare?

Viteza de revenire la presiunea atmosferică după o scufundare, deci viteza decompresiei, este dictată, în mod direct, de timpul necesar eliminării gazului inert dizolvat, în țesuturile organismului uman, pe timpul lucrului sub presiune. Această cantitate de gaz inert dizolvată este funcție de presiunea parțială a acestuia în amestecul respirator. Deci, pentru o adâncime (presiune) dată, cu cât va fi mai mult oxigen în amestecul respirator cu atât cantitatea de gaz inert ce se va dizolva în țesuturi va fi mai mică și, implicit, viteza de revenire la presiunea atmosferică poate fi mai mare. Spre exemplu, pentru o scufundare de o oră la 90 m adâncime, dacă amestecul HELIOX respirat pe timpul imersiei conține 2% oxigen ($r_{O_2} = 0{,}02$), decompresia efectuată cu amestec cu 24% oxigen ($r_{O_2} = 0{,}24$) va dura 15 ore și 50 minute, iar dacă amestecul HELIOX respirat pe timpul imersiei conține 20% oxigen ($r_{O_2} = 0{,}20$), decompresia efectuându-se cu amestec cu 24% oxigen ($r_{O_2} = 0{,}24$), poate dura numai 10 ore și 40 minute. Datele sunt prezentate în tabelul 1.13.

Tabelul 1.13 Comparație între duratele decompresiilor pe timpul cărora s-au folosit amestecuri respiratorii HELIOX cu concentrații diferite de oxigen

Scufundare de 1 oră la adâncimea de 90 m				
Amestec respirator de lucru	2/98[1)]			20/80
Amestec respirator la decompresie	12/88	24/76	36/64	24/76
Durata totală a decompresiei (ore. minute)	20.30	15.50	12.30	10.40

[1)] Rapoartele de acest gen se vor citi: 2% O_2 și 98% He.

La fel de concludente sunt și tabelele de decompresie calculate în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța, după scufundări în care se utilizează amestecuri respiratorii NITROX supraoxigenate, conform datelor prezentate în tabelul 1.14 pentru o scufundare de 100 minute la adâncimea de 30 m.

Tabelul 1.14 Comparație între duratele decompresiilor pe timpul cărora s-au folosit amestecuri respiratorii NITROX supraoxigenate și aer

Scufundare de 100 minute la adâncimea de 30 m				
Amestec respirator la decompresie	Aer	NITROX		
		30% O2	40% O2	50% O2
Durata totală a decompresiei (minute)	88,4	45,6	20,8	2,8

Se poate remarca scăderea considerabilă a timpului necesar pentru revenirea scafandrului la presiunea atmosferică în cazul utilizării amestecurilor NITROX supraoxigenate comparativ cu utilizarea aerului comprimat. Acesta este motivul pentru care scufundarea cu amestecuri supraoxigenate a căpătat o largă aplicabilitate în operațiuni cu caracter militar.

1.6 EFECTELE GAZELOR INERTE DIN AMESTECURILE RESPIRATORII

Indiferent de gazul inert utilizat ca diluant al oxigenului, unul dintre marile neajunsuri ale acestuia este efectul narcotic pe care îl induce. Se admite, în prezent, că acțiunea fiziologică a unui amestec respirator depinde de compoziția sa, de concentrația constituenților și de presiunea la care este respirat. Ultimii doi factori, corelați cu acțiunea fiziologică a unui amestec respirator, determină presiunea maximă admisă pentru gazul inert astfel încât efectul narcotic al acestuia să nu-și facă apariția.

Narcoza este caracterizată de un ansamblu de perturbații ale comportamentului, judecății, coordonării neuro-musculare, care antrenează o scădere importantă a eficacității scafandrului până la ineficacitate și chiar moarte. Fazele de evoluție ale narcozei sunt excitația și inhibiția. Excitația este o fază de scurtă durată, în care apar simptome de hiperreflexivitate, neliniște și agitație. Inhibiția urmează imediat, cu simptomele ei: somnolență, bradicardie și hiporeflexivitate până la lipotimie. Cert este că toți scafandrii care coboară sub 30 m încearcă un sentiment de bună dispoziție. Este vorba de o ușoară euforie comparabilă cu un stadiu inițial de beție alcoolică. Această ușoară "beție" este reversibilă și fără urmări și este periculoasă numai pentru scafandri începători și izolați. "Beția" dispare instantaneu în momentul ridicării spre suprafața apei cu câțiva metri.

Narcoza nu se manifestă, în mod regulat, la toți scafandrii și la aceeași adâncime. Limita zonei de securitate este influențată de predispoziția individuală și de antrenamentul progresiv, favorabil echilibrării structurii mintale. Narcoza poate fi o cauză a morții prin înec la adâncimi mari și trebuie pusă pe seama imprudenței scafandrului și a ostilității mediului ambiant.

În ceea ce privește explicația mecanismului narcozei, au fost emise o serie de ipoteze, mai mult sau mai puțin realiste. Mecanismul exact nu se cunoaște, dar sunt demne de enumerat câteva ipoteze, rezultate în urma cercetărilor întreprinse:

- acțiunea specifică a gazului inert;

- creșterea presiunii parțiale a dioxidului de carbon alveolar și/sau tisular;
- fenomenele fiziopatologice în care oxigenul joacă un rol preponderent.

În afară de narcoza gazului inert utilizat pentru diluarea oxigenului din amestecul respirator, mai există și alți factori limitatori importanți așa cum sunt **S**indromul **N**ervos al **Î**naltelor **P**resiuni (**SNIP**), **S**indromul **R**espirator al **Î**naltelor **P**resiuni (**SRIP**) și **S**indromul **A**rticular al **Î**naltelor **P**resiuni (**SAIP**). În tabelul 1.15 sunt prezentate limitele de adâncime de scufundare datorită factorilor limitatori specifici diferitelor amestecuri respiratorii utilizate în scufundare.

Tabelul 1.15 Limitele adâncimii de scufundare pentru diferitele amestecuri respiratorii

Adâncime de scufundare [m]	**Amestec respirator**	**Factori limitatori**
0...60	Aer (NITROX) (N_2 - O_2)	Narcoza azotului Jenă respiratorie
60...150	HELIOX (He - O_2)	–
60...200	HIDROX (H_2 - O_2)	Narcoza hidrogenului
150...450	HELIOX (He - O_2) HIDRELIOX (H_2 - He - O_2)	SNIP – SRIP – SAIP
450...700	HIDRELIOX (H_2 - He - O_2)	SNIP – SRIP

Se poate trage concluzia că, de fapt, nu există decât o singură "narcoză" la care tulburările apar mai devreme sau mai târziu în funcție de puterea narcotică a amestecului gazos utilizat. Această binecunoscută "putere narcotică" nu este direct proporțională cu proprietățile fizice ale gazelor, dar este proporțională cu coeficienții lor de solubilitate în lipide.

În tabelul 1.16 se prezintă scara puterilor narcotice P.N. a gazelor inerte și a protoxidului de azot NO_2 în funcție de puterea narcotică a azotului caracterizat prin valoarea 1.

Tabelul 1.16 Tabel cu puterile narcotice ale gazelor zise "inerte" și NO2

Gaz	He	Ne	H_2	N_2	Ar	Kr	N_2O	Xe
P.N.	0,07	0,2	0,26	1	1,7	10	28,1	34,5

Un alt neajuns, la fel de important, îl constituie faptul că la decompresie gazul inert formează bule care pot provoca accidente serioase în cazul nerespectării unei proceduri specifice de revenire la presiunea atmosferică. În plus, absența prelungită a azotului din amestecurile respiratorii poate sta la baza unor importante modificări de ordin fiziologic, iar în perioada schimbărilor de amestecuri respiratorii apare, la nivelul membranelor celulare, o contradifuzie izobarică a gazelor inerte dizolvate în țesuturile umane.

1.6.1 Efectele azotului din amestecurile respiratorii

Limitele impuse de azot sunt legate de efectul narcotic al acestuia. Efectele sunt detectabile, pentru respirarea de aer, începând de la 35...40 m adâncime. Primele simptome nu sunt grave, dar la subiecții neantrenați pot apărea complicații. Limitele impuse de azot în scufundare sunt prezentate în figura 1.3.

Pe abscisă este reprezentată adâncimea de scufundare în metri și presiunea corespunzătoare în bar (sc. abs.), iar pe ordonată sunt reprezentate concentrațiile de oxigen ($\% O_2$) și de azot ($\% N_2$) din amestecul binar NITROX. Curba din figură este locul geometric al punctelor a căror presiune parțială a azotului este $p_{N_2} = 4$ bar (sc. abs.). Respirând un amestec NITROX caracterizat printr-o presiune parțială a azotului peste valoarea corespunzătoare curbei cu $p_{N_2} = 4$ bar (sc. abs.), se riscă apariția narcozei cu azot (beția adâncurilor).

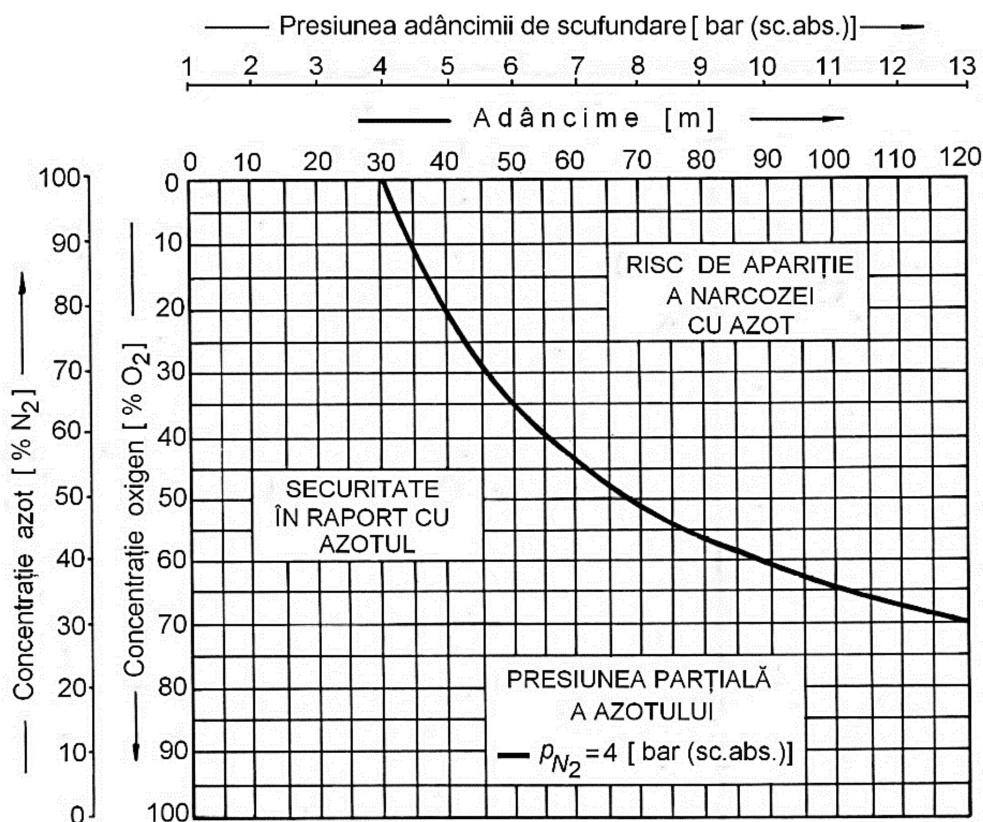


Figura 1.3 Reprezentarea grafică a limitelor impuse pentru azot în amestecurile respiratorii

Practic, se poate spune că narcoza cu azot pentru utilizarea aerului ca amestec respirator, apare începând de la adâncimea de 50 m, funcție de individ și că, de la 70 m adâncime, nimeni nu scapă de acest efect.

Narcoza cu azot a fost observată încă din anul 1835 de către Franchman care arată: "funcțiile creierului sunt activate, imaginea este vioaie, ideile au un șarm ciudat". Abia după o sută de ani, în 1935, Behnke descrie pentru prima dată tulburările provocate de azot, acea beție a adâncurilor, numită de către Hill și Mac Leod, în anul 1930, "nytrogen narcosis".

Efectele narcotice ale azotului din aerul respirat la presiuni ridicate par mai apropiate de efectele provocate LSD-25 sau de efectele datorate intoxicațiilor etilice. De asemenea, se mai pot compara cu efectele narcotice ale unor droguri ca morfina, barbituricele sau etanolul. Totuși, mecanismele nu sunt similare.

1.6.2 Efectele heliului din amestecurile respiratorii

Numeroși cercetători, printre care Case și Haldane, Marshale, Behnke, Bennett și Brauer au efectuat corelații între proprietățile gazelor inerte și puterea lor narcotică. Toți au fost de acord că heliul ocupă o poziție privilegiată față de celelalte gaze inerte. Într-adevăr, dacă se iau în considerație polarizabilitatea diferitelor gaze inerte și raportul acesteia la volumul molar, constanta a de atracție intermoleculară (forța Van der Waals), solubilitatea în lipide și raportul solubilității în grăsimi și apă, funcție de teoria coeficientului de partaj a lui Mayer-Overton, prin care un anestezic are o putere narcotică cu atât mai mare cu cât este mai solubil în apă, heliul se află pe primul loc în ceea ce privește majoritatea proprietăților fizice. Hidrogenul și neonul se află imediat după heliu și înaintea azotului.

În continuare sunt prezentate, spre exemplificare, performanțele obținute în scufundare cu amestecuri respiratorii HELIOX de către unele școli de scufundare. Astfel, în figura 1.4 este prezentat profilul scufundării ATLANTIS III, efectuată de specialiștii americani la adâncimea de 688 m în cadrul F. G. Hall Laboratory din Duke University Medical Center (figura 1.5), iar în figura 1.6 profilul scufundării SAGITTAIRE IV, efectuată de către francezi la adâncimea de 610 m în cadrul Centre d’Essais Hyperbares (CEH) COMEX din Marsilia (figura 1.7).

În România, prin eforturile depuse de colectivul Laboratorului Hiperbar de pe lângă Centrul de Scafandri din Constanța, în anul 1984 s-a atins adâncimea record de 500 m în cadrul experimentului PONTUS IV, utilizându-se o tehnologie originală cu amestecuri respiratorii binare heliu-oxigen (HELIOX).

Presurizarea scafandrului cu amestecuri heliu-oxigen, induce, la adâncimi ce depășesc 150…180 m, apariția așa numitului sindrom norvos al înaltelor presiuni (S.N.I.P.). Acest sindrom se traduce prin:

- tulburări motorii: tremur și dismetrie, imprecizie și necoordonare a gesturilor, pierderea echilibrului;
- scăderea nivelului de vigilență, tendințe spre dezinteres, încetinire mintală și somnolență;
- modificări electroencefalografice precare și discrete la început, importante mai apoi, cu instalarea de trasee și bufee de unde lente.

Aceste trasee sunt îngrijorătoare pentru că nu corespund nici somnului normal nici celui antestezic.

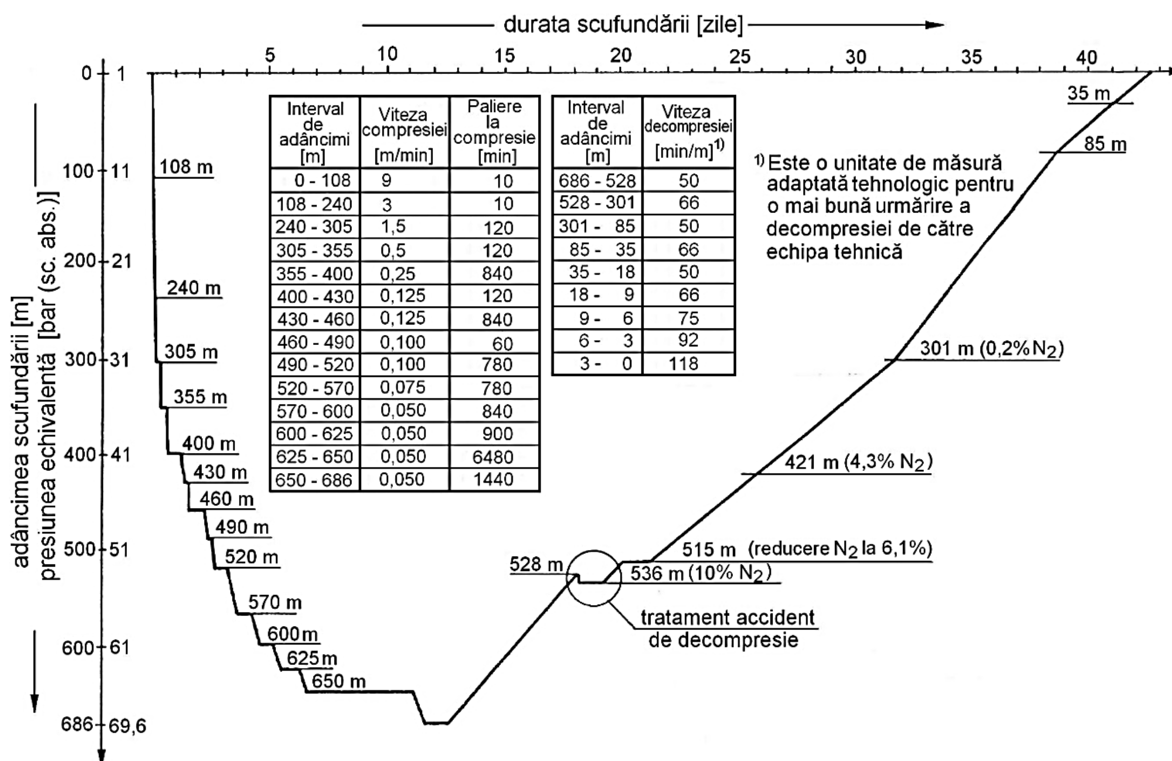
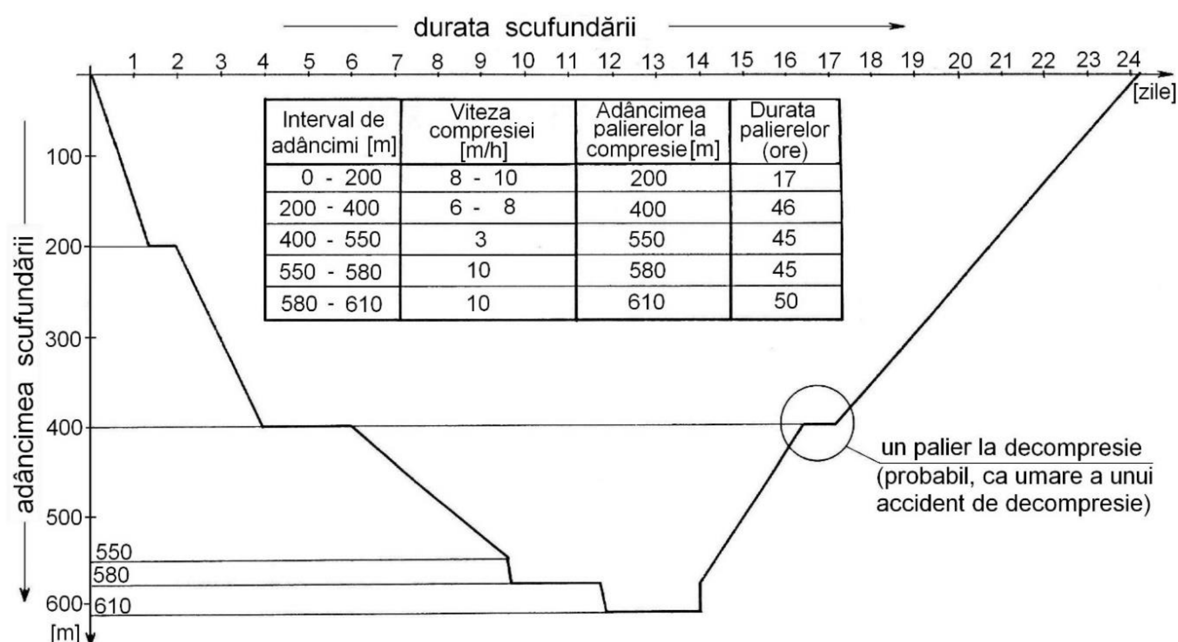


Figura 1.4 Profilul scufundării în saturație ATLANTIS III executată la F.G Hall Laboratory, Duke University Medical Center



Figura 1.5 Scafandri americani în timpul unui experiment din programul ATLANTIS III, în barocamera aflată în dotarea F. G. Hall Laboratory din Duke University Medical Center



Interval de adâncimi [m]	Viteza compresiei [m/h]	Adâncimea palierelor la compresie [m]	Durata palierelor (ore)
0 - 200	8 - 10	200	17
200 - 400	6 - 8	400	46
400 - 550	3	550	45
550 - 580	10	580	45
580 - 610	10	610	50

Figura 1.6 Profilul aproximativ al scufundării în saturație SAGITTAIRE IV executată la Centre d'Essais Hyperbares (CEH) COMEX din Marsilia



Figura 1.7 Barocameră utilizată pentru scufundări cu HELIOX, aflată în compunerea ansamblului de barocamere din cadrul Centre d'Essais Hyperbares COMEX din Marsilia

Pentru ameliorarea S.N.I.P. au fost efectuate cercetări care s-au axat pe două direcții:

- reducerea vitezelor de compresie (presurizare) a scafandrilor și efectuarea de paliere de acomodare la diferite adâncimi considerate critice;
- injectarea de azot în amestecul respirator heliu-oxigen în proporții de 5...20%, pentru a se profita de efectul narcotic al acestuia în ameliorarea S.N.I.P.

Ambele direcții au dat rezultate satisfăcătoare, omul putând pătrunde sub apă la adâncimi mai mari de 500 m, respirând fie un amestec sintetic binar heliu-oxigen (HELIOX), fie un amestec sintetic ternar heliu-azot-oxigen (TRIMIX). Astfel, în anul 1974, COMEX prin programul SAGITTAIRE, atinge în scufundare

simulată adâncimea de 610 m utilizând amestecuri binare HELIOX, iar în anul 1981, prin experimentul ATLANTIS III efectuat în Laboratorul Hiperbar de la Duke University se atinge, în scufundare simulată, adâncimea de 686 m utilizând amestecuri ternare TRIMIX.

1.6.3 Efectele hidrogenului din amestecul respirator

Pentru depășirea problemelor create de cei doi factori limitatori ai eficacității scafandrului în scufundări la adâncimi de peste 150...180 m (**S**indromul **N**ervos al **Î**naltelor **P**resiuni – **S.N.I.P.** și limitările ventilării respiratorii prin mărirea rezistenței respiratorii datorită creșterii densității amestecului gazos de o manieră proporțională cu adâncimea), s-a impus necesitatea efectuării de cercetări și programe de scufundare de încercare privind utilizarea hidrogenului ca diluant al oxigenului.

Riscurile deosebite care pot apărea la utilizarea hidrogenului în scufundare prin pericolul de explozie, au impus o serie de măsuri speciale. În plus, puritatea hidrogenului obținut industrial nu a satisfăcut datorită conținutului de poluanți. Pentru experimentări umane hidrogenul trebuie obținut prin procese catalitice, purificat criogenic, până la puritatea de 99,995%. Impuritățile acceptabile sunt: O_2 < 100 ppm, N_2 < 100 ppm, CO < 5 ppm, CH_4 < 5 ppm, arsine și fosfine < 0,0015 ppm.

Prima scufundare în saturație, cu oameni în ambianță hiperbară și utilizând amestec respirator hidrogen-oxigen (HIDROX), s-a efectuat în anul 1985 prin experimentul HYDRA V la adâncimea de 450 m. Experimentele au contituat în anul 1986 cu scufundarea HYDRA VI la adâncimea de 520 m, în anul 1987 cu scufundarea HYDRA VII la adâncimea de 260 m și în anul 1988 cu scufundarea HYDRA VIII cu 6 oameni timp de 6 zile la adâncimea de 530 m, scufundare realizată în condiții reale, în mare. Aceste experimente efectuate de către COMEX din Franța au deschis drumul unei noi metode de lucru sub apă pe șantierele subacvatice.

Pentru exemplificare, în figura 1.8 este prezentat profilul scufundării în saturație, cu amestec respirator HIDROX, la adâncimea de 260 m, al experimentului HYDRA VII. În figura 1.9 este prezentată o schemă generală a ansamblului de scufundare utilizat pentru acest experiment.

În experimentul HYDRA VII scafandrii au fost comprimați în 4 ore, cu amestec HELIOX, la adâncimea de 180 m, după care amestecul HELIOX a fost înlocuit cu amestec HIDROX până când, în noul amestec din ansamblul de scufundare, concentrația hidrogenului s-a ridicat la 90%. În această perioadă s-a constatat la scafandri o ușoară euforie timp de 15...30 minute, comparabilă cu narcoza constatată în scufundări cu aer comprimat la adâncimea de 40...50 m. Această ușoară narcoză a dispărut destul de rapid, ceea ce a permis continuarea presurizării la presiunea corespunzătoare adâncimii de 260 m. Înainte de compresie s-a efectuat dehidrogenarea, timp de 40 ore, la 260 m, cu viteza de 0,6 bar (sc. abs.) de hidrogen pe oră. Decompresia finală s-a efectuat cu amestec HELIOX.

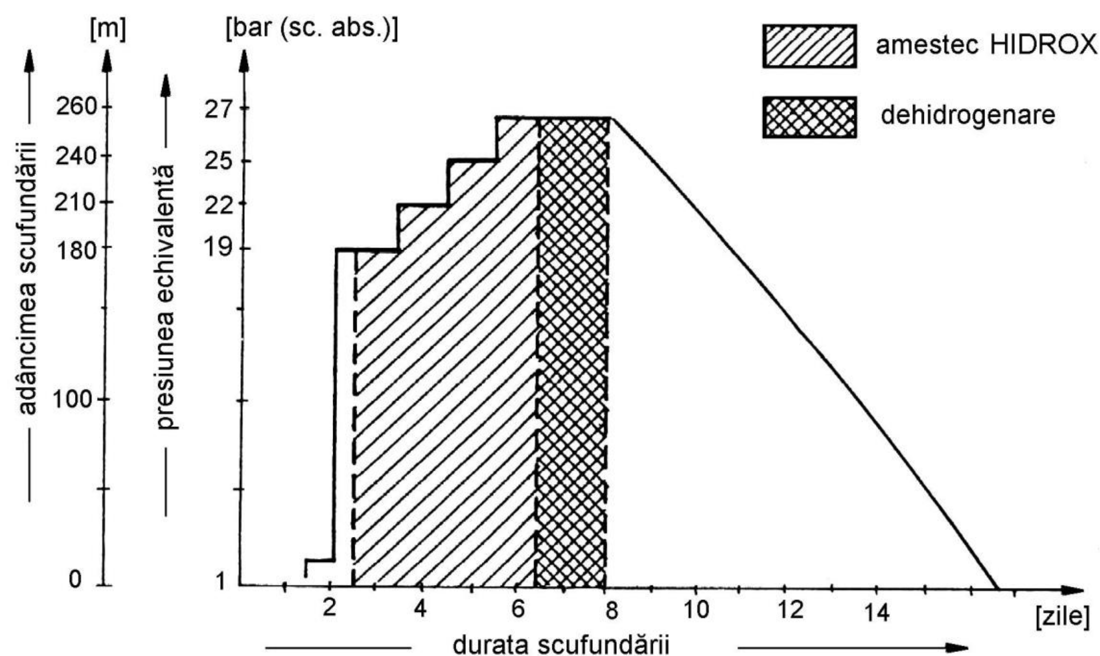


Figura 1.8 Profilul scufundării în saturație cu amestec respirator HIDROX efectuată în cadrul experimentului HYDRA VII (COMEX)

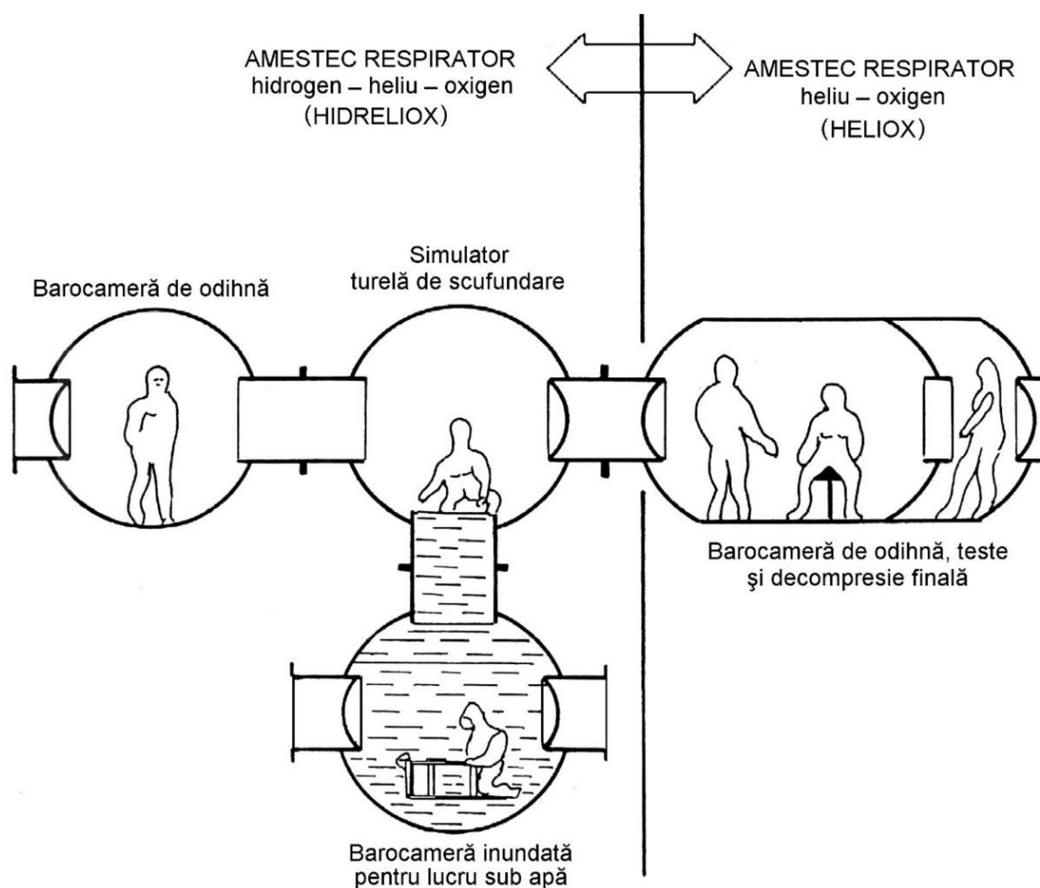


Figura 1.9 Schema generală a ansamblului de scufundare utilizat pentru experimentul HYDRA VII (COMEX)

Scufundările experimentale cu utilizarea hidrogenului efectuate de COMEX la Centrul de Încercări Hiperbare din Marsilia, au continuat cu experimentul HYDRA IX în anul 1989, care a permis precizarea domeniului de utilizare a amestecului HIDROX și efectele asupra omului la o expunere de lungă durată.

În anul 1992, în barocamerele Centrului de Încercări Hiperbare al COMEX din Marsilia (figura 1.10) s-a realizat scufundarea de testare HYDRA X, în care, după 13 zile de compresie, scafandrul Theo Mavrostomos a atins adâncimea record de 701 m [71,1 bar (sc. abs.) sau 7,11 MPa (sc. abs.)] (figura 1.11). Acesta a efectuat și o demonstrație de lucru pe durata a trei ore în barocamera cu apă (figura 1.12).



Figura 1.10 Barocamere aparținând sistemului pentru scufundări simulate cu amestecuri pe bază de hidrogen din cadrul C.E.H. COMEX din Marsilia



Figura 1.11 Scafandrul Theo Mavrostomos aflat la adâncimea record de 701 m în cadrul programului HYDRA X



Figura 1.12 Demonstrație de lucru efectuată de Theo Mavrostomos în barocamera cu apă (experimentul HYDRA X – 701 m)

Rezultatele obținute în utilizarea hidrogenului ca diluant al oxigenului pentru scufundări în saturație la adâncimi mari au fost pozitive. Problemele tehnice legate de injectarea oxigenului în incintele hiperbare, pentru completarea celui consumat de scafandri, precum și problemele legate de etanșare, au fost rezolvate și s-a concluzionat că hidrogenul poate constitui o nouă soluție, ca diluant al oxigenului, pentru viața sub presiune.

În cursul scufundărilor din cadrul programului francez HYDRA, efectuate cu amestecuri respiratorii pe bază de hidrogen, la presiuni parțiale ale hidrogenului $p_{H_2} = 1,9...3$ MPa (sc. abs.) (tabelul 1.17), s-au observat anumite efecte ale amestecului pe bază de hidrogen asupra organismului uman, efecte ce pot fi grupate sub denumirea de narcoza hidrogenului. Aceste efecte au putut fi studiate în raport cu observațiile clinice efectuate în timpul scufundărilor la adâncimi echivalente utilizând un amestec HELIOX.

A rezultat faptul că hidrogenul acționează asupra organismului uman astfel:

- provoacă manifestări psiho-senzoriale și comportamentale stăpânite (tulburări de percepție, modificări ale somnului, modificări psihologice și de intelect, pentru $p_{H_2} <$ 2,4 MPa (sc. abs.)) sau nestăpânite (anxietate, depresie, stare de confuzie și dezorientare, pentru $p_{H_2} = 2,4...3$ MPa (sc. abs.)) de către scafandri;
- atenuează efectele provocate de sindromul nervos al înaltelor presiuni – SNIP (dispariția aproape completă a tremurului), de sindromul articular al înaltelor presiuni – SAIP (atenuarea netă a durerilor și jenelor articulare) și de sindromul respirator al înaltelor presiuni – SRIP (ventilare facilă cu efort muscular respirator mai puțin intens).

Testele efectuate de către COMEX în cadrul programului de scufundări HYDRA au pus în evidență faptul că, pentru un amestec pe bază de hidrogen cu o presiune parțială a hidrogenului în zona a 2 MPa (sc. abs.), tulburările datorate "narcozei hidrogenului" sunt bine controlate și compensate de către scafandri. De asemenea, se poate desprinde faptul că, prin utilizarea de amestecuri respiratorii pe bază de hidrogen, zona de adâncimi cuprinsă între 150 m și 650 m poate fi considerată ca accesibilă unei largi categorii de scafandri. Amestecul respirator HIDRELIOX, limitând efectele SNIP și mărind confortul respirator, ameliorează în mod considerabil eficacitatea și capacitatea de lucru a scafandrilor la instalațiile submarine de producție a hidrocarburilor. Astfel, companiile petrolifere sunt, în prezent, asigurate de o capacitate tehnică umană în zonele cu adâncimi ce depășesc posibilitățile scufundării convenționale cu heliu (adâncimi de peste 200 m).

Avantajele utilizării hidrogenului sunt legate și de abundența acestuia, comparativ cu heliul. Totuși, hidrogenul nu poate înlocui complet heliul, în special la decompresie, când concentrația oxigenului crește pe măsură ce scade presiunea, până la 24%, pe ultimii 10 m spre presiunea atmosferică.

Hidrogenul are dezavantajul că este un gaz exploziv când este amestecat cu aer în proporții ce includ prezența a 5,3% oxigen. În amestec cu peste 4% oxigen, hidrogenul devine, în mod spontan, exploziv. Pentru a se evita riscul combinației chimice, concentrația volumică de oxigen din amestecul respirator HIDROX trebuie să fie mai mică de 4% (r_{O_2} < 0,04). Cuprinsă între 2,5% și 0,6% (r_{O_2} = 0,025...0,006), deci inofensiv în combinație cu hidrogenul, această concentrație de oxigen permite utilizarea amestecului HIDROX la scufundări la adâncimi cuprinse între 70 și 700 m.

1.7 REZULTATELE CERCETĂRILOR EFECTUATE ÎN ROMÂNIA PRIVIND EFECTELE AMESTECURILOR RESPIRATORII

Din cercetările efectuate în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța sunt prezentate două situații în care au fost determinate performanțele mintale ale scafandrilor: în scufundări cu aer comprimat la adâncimea de 72 m și în scufundări în saturație cu amestecuri binare NITROX. Pentru scufundările cu aer la adâncimea de 72 m viteza compresiei a fost de 15 m/min, iar pentru scufundările în saturație cu NITROX viteza compresiei a fost de 1 m/min. Testele au constat în efectuarea unor operațiuni matematice (adunare, scădere, înmulțire și împărțire) la suprafață (la presiunea atmosferică) și imediat după terminarea compresiei. S-a determinat variația performanței obținute după compresie față de rezultatele obținute la presiunea atmosferică.

În scufundările cu aer comprimat la 72 m adâncime au fost investigați 50 de scafandri. La 64,6% dintre aceștia s-au constatat deteriorări ale performanței intelectuale, în timp ce la 35,4% din numărul scafandrilor nu au apărut modificări sau chiar au crescut performanțele. Din totalul scafandrilor investigați, 52,26% s-au încadrat în limitele de variație a performanței cuprinse între -10% și +20%, 68,76% în limitele cuprinse între -20% și +20% și 85,43% în limitele cuprinse între -30% și +20%. Rezultatele obținute au stat la baza definirii limitelor aptitudinii de scufundare în cadrul testului de narcoză, pentru scafandrii profesioniști ce execută scufundări cu aer comprimat până la adâncimea de 60 m, considerându-se acceptabile limitele de variație a performanței intelectuale cuprinse între -30% și +20%.

S-au adoptat limite atât în zona de scădere a performanței cât și în zona de creștere a performanței deoarece, în operațiunile subacvatice este nevoie de oameni bine echilibrați psihic. În general, nu sunt acceptate extremele, chiar dacă sunt pozitive. Reacțiile acestor oameni nu sunt totdeauna previzibile.

În cazul scufundărilor în saturație la adâncimea de 50 m cu amestecuri respiratorii NITROX, deteriorarea performanței intelectuale a avut loc la 50% din numărul scafandrilor investigați, deteriorare ce nu a depășit 10%. O concluzie imediată reiese din faptul că efectul narcotic al azotului se datorează nu numai gazului inert ci și modului de executare a compresiei (pătrunderii sub apă).

Creșterea vitezei de compresie amplifică efectele narcotice ale azotului. Această amplificare se poate pune pe seama unui sindrom nervos și/sau creșterii presiunii parțiale a dioxidului de carbon din amestecul respirat.

Tabelul 1.17 Scufundările experimentale în saturație, cu amestecuri respiratorii pe bază de hidrogen, realizate de C.E.H. COMEX

Scufundarea experimentală	**Adânci mea de scufundare** [m]	**Tip amestec respirator utilizat**	**Presiunea amestecului respirator** p_{am} [bar (abs)]	**Presiunea parțială a hidrogenului** p_{H_2}		**Timp de expunere la amestec cu hidrogen** [zile]	**Număr scafandri**
				MPa (abs)	bar (abs)		
HYDRA V (1985)	450 450	HIDRELIOX (H_2-He-O_2)	46 46	2,5 2,5	25 25	4 18	3 3
HYDRA VI (1986)	520	HIDRELIOX (H_2-He-O_2)	53	2,4	24	15	8
HYDRA VII (1987)	260	HIDROX (H_2-O_2)	27	2,5	25	5	4
HYDRA VIII (1988)	520/534	HIDRELIOX (H_2-He-O_2)	53/54,4	2,5	25	18	6
HYDRA IX (1989)	300 225/200	HIDROX (H_2-O_2)	31 23,5/21	3 1,9	30 19	19 30	4 3
HYDRA X (1992)	675/701	HIDRELIOX (H_2-He-O_2)	68,5/71,1	2,0	20	29	3

Pentru scufundări cu amestecuri respiratorii HELIOX, la Laboratorul Hiperbar din Constanța s-au efectuat două experimente. Concentrația azotului din amestecul respirator HELIOX utilizat nu a depășit 4%. În experimentul efectuat la adâncimea de 250 m s-a observat o variație a performanței intelectuale cuprinsă între -16,7% și +13,9%, la testele efectuate imediat după atingerea presiunii de 26 bar (sc. abs.). În experimentul efectuat la adâncimea de 350 m, la testele efectuate imediat după atingerea presiunii maxime, variația performanței intelectuale s-a încadrat între limitele -52,8% și +16,7%, după 12 ore de staționare la presiunea maximă între limitele -38,9% și +23,3%, după 24 ore între limitele -16,7% și +41,7% și după 48 ore între limitele -27,8% și + 36,2%. O evoluție interesantă o are unul dintre subiecți care de la performanța de -52,8% stabilită imediat după terminarea compresiei, ajunge, după 48 ore de acomodare, la performanța pozitivă de +2,7%.

În ambele experimente s-a putut constata o ameliorare bună a performanței intelectuale pe timpul acomodării cu presiunea și cu amestecul respirator sintetic HELIOX. Efectul narcotic al heliului se poate pune în evidență la presiuni mai mari de 26 bar (sc. abs.). Din cercetările efectuate în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța au rezultat primele bareme românești de aptitudine pentru scufundări cu aer comprimat și cu amestecuri sintetice NITROX și HELIOX.

2

PROCEDEE DE SCUFUNDARE, INSTALAȚII, ECHIPAMENTE HIPERBARE ȘI APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ FOLOSITE ÎN DOMENIUL SCAFANDRERIEI

În funcție de scopul și natura misiunii pe care un scafandru, sau o echipă de scufundare, trebuie să o îndeplinească, este ales, spre a fi aplicat, unul dintre procedeele de scufundare prezentate în continuare.

2.1 PROCEDEE DE SCUFUNDARE

Procedeele de scufundare se încadrează în două categorii și anume:

- scufundări unitare;
- scufundări în saturație.

Diferența dintre aceste procedee o constituie fazele pe care un scafandru le parcurge din momentul demarării operațiunii și până la revenirea lui la suprafață.

2.1.1 Scufundările unitare

Scufundările unitare sunt acele scufundări la care fazele constituente se derulează în mod succesiv. Astfel, etapa de coborâre la adâncimea de lucru, adică compresia scafandrului, lucrul în imersie și revenirea la presiune atmosferică (decompresia scafandrului) se derulează fără pauze între ele. Prezentarea, sub formă grafică, a acestui procedeu este dată în figura 2.1.

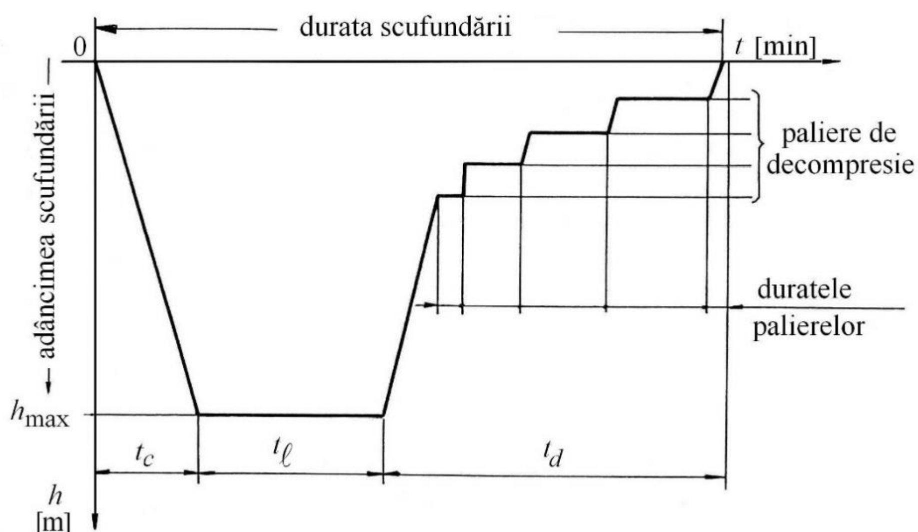
Efectuarea unei misiuni de scufundare unitară poate decurge în două moduri după cum urmează:

- scufundare unitară autonomă;
- scufundare unitară de sistem.

Pornind de la figura 2.1, se remarcă următoarele etape particulare ale scufundărilor unitare:

- *compresia* care se execută continuu, pe o durată notată cu t_c, cu viteză constantă pe intervale de adâncimi, funcție de adâncimea la care trebuie executată misiunea;
- *lucrul sub apă* care se execută continuu, se desfășoară în condiții de presiune constantă, corespunzătoare adâncimii maxime de scufundare h_{max}, și are o durată notată cu t_l ;

- *decompresia* (revenirea la presiune atmosferică a scafandrului) care se execută, în funcție de adâncimea de scufundare, continuu sau/și în trepte; durata de realizare a acestei etape este notată cu t_d.



t_c – durata de compresie; t_l – durata de lucru în imersiune; t_d – durata de decompresie

Figura 2.1 Profilul unei scufundări unitare

Etapa de decompresie este cea mai dificilă parte a unei scufundări deoarece trebuie făcută astfel încât să permită eliminarea gazului inert dizolvat în țesuturile scafandrului ca urmare a expunerii la presiuni mult mai ridicate decât presiunea atmosferică. Din acest motiv, după o scufundare la o anumită adâncime, revenirea la presiune atmosferică se face cu staționarea scafandrului la anumite adâncimi stabilite prin calcul, pe durate determinate. Durata scufundării t_s rezultă așadar prin însumarea celor trei durate, de compresie, de lucru sub apă și de decompresie, conform relației 2.1:

$$t_s = t_c + t_l + t_d \tag{2.1}$$

Scufundările unitare autonome presupun pătrunderea scafandrului în mediul acvatic cu echipament de respirat individual (butelie/ butelii și detentor) ce îi asigură cantitatea amestecului respirator natural sau artificial la presiunea corespunzătoare adâncimii la care se află, pe întreaga durată a misiunii.

Acest tip de scufundare este cel mai comun, fiind practicată atât de scafandrii profesioniști în scop industrial sau militar cât și de cei amatori, în scop recreațional. În cazul intervențiilor executate de prima categorie de scafandri, în funcție de tipul amestecului respirator folosit și de nivelul de pregătire al scafandrului se pot atinge adâncimi de circa 60 - 70 m, durata de intervenție fiind însă foarte scurtă.

Scufundările unitare de sistem sunt caracterizate de faptul că amestecul respirator folosit de către scafandru este asigurat de la suprafață sau din echipamente și/sau vehicule imersabile de tipul turelelor de scufundare, submarinelor purtătoare de scafandri, laboratoarelor submerse etc. Așadar, în cadrul acestui tip de scufundări este necesar un suport logistic complex, cu ajutorul căruia să se susțină misiunea respectivă.

Încadrându-se în categoria scufundărilor unitare, scufundările unitare de sistem presupun ca cele trei faze și anume compresia, lucrul sub apă și decompresia să se succeadă continuu.

Din punct de vedere al adâncimilor și al duratei de intervenție, scufundarea unitară de sistem se caracterizează prin intervenții la adâncimi mari, de regulă până la 180 – 200 m și durate de lucru reduse. Fiind implicate procese fiziologice generate de expunerea la presiune și de durata la care organismul uman este supus unor astfel de schimbări de mediu, faza de decompresie va decurge în consecință. Astfel, în funcție de adâncimea de scufundare, faza de decompresie va respecta anumite procedee. Se cunoaște faptul că, până la adâncimea de 120 m, decompresia se face în trepte și paliere, iar peste această adâncime decompresia se va face continuu.

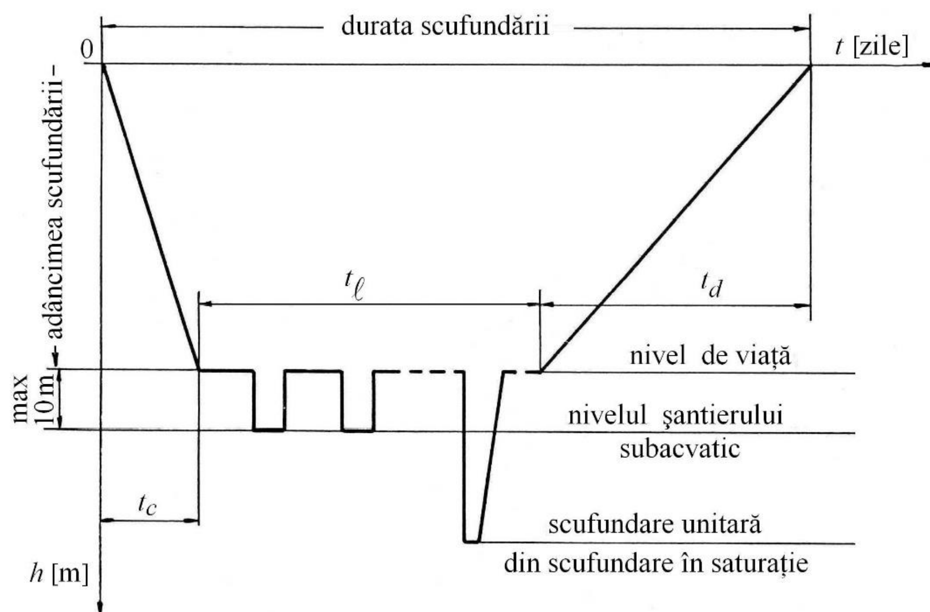
2.1.2 Scufundările în saturație

Scufundările în saturație presupun presurizarea scafandrilor în barocamere până la valori ale presiunii corespunzătoare adâncimii scufundării, urmată de transbordarea acestora în incinte presurizate precum turelele de scufundare prin intermediul cărora scafandrii sunt transportați la șantierul subacvatic. După efectuarea lucrului în imersie, scafandrii sunt readuși, tot prin intermediul turelelor și în aceleași condiții de presiune, înapoi în barocamere. Așadar, scufundările în saturație sunt scufundări de sistem. Pentru transportul scafandrilor mai pot fi utilizate minisubmarine purtătoare de scafandri. Echipamentele hiperbare sunt dotate cu instalații pentru prepararea și distribuția amestecurilor gazoase respiratorii, stații de stocare a gazelor pure și a amestecurilor fabricate și stații pentru controlul ambiental. Alimentarea cu amestec respirator a scafandrilor pe durata executării lucrărilor se face printr-un „ombilical”. Acesta reprezintă un ansamblu în alcătuirea căruia, pe lângă furtunul de alimentare cu amestec respirator, intră și un furtun de alimentare cu apă caldă pentru încălzirea costumului și un cablu pentru comunicații.

Deoarece prin presurizarea inițială a scafandrilor se urmărește saturarea țesuturilor cu gazul sau gazele inerte din compoziția amestecului respirator, etapa de decompresie se va executa o singură dată, la terminarea lucrărilor subacvatice. În acest mod, se va evita readucerea la presiune atmosferică a scafandrilor după încheierea fiecărei etape de lucru, fapt ce duce la eficientizarea intervenției creându-se astfel posibilitatea executării de misiuni de amploare, cu durate totale lungi.

Scufundările în saturație, al căror profil general este prezentat în figura 2.2, se aplică în intervalul de adâncimi 48 ÷ 600 m și în mod obligatoriu în cazul intervențiilor reale pentru adâncimi de lucru ce depășesc 180 m.

Scufundările în saturație implică parcurgerea unor etape ce sunt prezentate în continuare.



t_c – durata de compresie; t_l – durata de lucru în imersiune; t_d – durata de decompresie

Figura 2.2 Profilul unei scufundări în saturație

Compresia care se execută în barocamere aflate la suprafață, la bordul navelor, sau în centre hiperbare, până la presiuni în general cu 1 bar mai mici decât valoarea corespunzătoare adâncimii de lucru, presiunea astfel stabilită corespunzând condițiilor hiperbare la care se odihnesc scafandrii între două scufundări de lucru, adâncime denumită *nivel de viață*. Etapa de compresie poate să decurgă continuu, cu aceeași viteză de compresie, cu viteze diferite, dar constante pe intervale de adâncimi sau discontinuu pe paliere, acest din urmă procedeu fiind aplicat din motive tehnologice sau fiziologice, de exemplu pentru odihna scafandrilor.

Transportul la adâncimea de lucru care se execută cu turele de scufundare sau minisubmarine presurizate inițial la valori similare barocamerei, adică la presiunea corespunzătoare nivelului de viață, iar ulterior transbordării scafandrilor se efectuează o nouă etapă de presurizare prin creșterea presiunii până la valoarea corespunzătoare adâncimii de lucru.

Părăsirea mijlocului de transport se realizează după presurizarea turelei sau a barocamerei minisubmarinului la valoarea echivalentă cu cea a adâncimii de lucru, adică după asigurarea echipresiunii dintre mediul interior și mediul exterior. Scafandrul /scafandrii (maximum doi) părăsesc incinta pentru a derula

activități în cadrul șantierului subacvatic, durata maximă de lucru fiind de maximum 3 ore. După expirarea duratei de lucru, scafandrul sau echipa de scafandri este readusă în barocamera de la suprafață unde urmează o perioadă de odihnă în condiții de presiune corespunzătoare nivelului de viață. Pentru o echipă de scafandri, operațiunea se repetă la intervale de șase ore, iar după finalizarea lucrărilor urmează decompresia scafandrilor.

Decompresia decurge în general continuu, vitezele necesare pentru parcurgerea acestei etape fiind dictate, pe de o parte, de natura gazului sau a gazelor inerte din compoziția amestecului respirator și, pe de altă parte, de presiunea corespunzătoare nivelului de viață.

Ca și în cazul scufundărilor unitare, durata totală a scufundărilor în saturație este exprimată generic prin relația 2.1.

În cazul șantierelor subacvatice aflate la adâncimi mari, cele două procedee de scufundare și anume scufundarea unitară de sistem și scufundarea în saturație se pot combina, tehnica astfel rezultată fiind cunoscută sub denumirea de „scufundare unitară cu plecare din scufundare în saturație”. Practic, diferența dintre scufundarea unitară și scufundarea combinată constă în faptul că, în cazul celei dintâi presiunea de plecare este cea atmosferică, pe când în cazul celei de a doua, presiunea de la care se începe scufundarea este cea corespunzătoare nivelului de viață. Pentru exemplificare, figura 2.2 conține reprezentarea profilului unei scufundări unitare cu plecare din scufundare în saturație.

2.2 ECHIPAMENTE HIPERBARE FOLOSITE ÎN DOMENIUL SCAFANDRERIEI

Fie că este vorba de procedeul unitar fie de cel în saturație, scufundările de sistem presupun utilizarea unei baze materiale dezvoltate alcătuită dintr-o serie de aparate, echipamente și vehicule fără de care incursiunile subacvatice la mari adâncimi nu ar fi posibile. Totodată, prin intermediul acestor mijloace tehnice și abordând o anumită strategie, se dorește obținerea unui randament cât mai bun al intervenției subacvatice.

Echipamentele hiperbare folosite frecvent în misiuni de scufundare în saturație sunt barocamerele și turelele de scufundare. În funcție de complexitatea intervenției și de aspectele particulare ale acesteia, pot fi folosite și vehicule autopropulsate și alte tipuri de echipamente dintre care unele sunt descrise în continuare.

2.2.1 Barocamerele

Barocamerele sunt incinte închise, presurizabile, folosite în cadrul misiunilor reale de scufundare sau pentru simulări și teste de aptitudini sau pentru intervenții și studii medicale.

Referitor la barocamerele destinate strict domeniului scufundărilor, aceste echipamente sunt concepute într-o gamă relativ mare. Variantele de realizare

sunt monoloc sau multiloc, ca echipamente fixe sau mobile, cu unul sau mai multe compartimente, având diverse dimensiuni, realizate din diferite materiale și funcționând la presiuni de lucru diferite.

Barocamerele monoloc sunt folosite în special pentru intervenții medicale urgente, urmate de transportarea scafandrilor ce au suferit accidente de decompresie către centre hiperbare unde vor continua tratamentul. În alcătuirea lor constructivă intră corpul barocamerei, sistemul de stocare și distribuție a amestecului respirator, echipamentele de monitorizare a presiunii din incită și organele le reglaj necesare ajustării parametrilor ambientali interiori, elementele pentru cuplarea la barocamerele pentru tratament, sistemele de comunicare radio, sasul pentru medicamente și hublourile.

Barocamerele multiloc sunt echipamente fixe, fie amplasate pe țărm în laboratoare hiperbare, fie la bordul navelor sau pe platforme marine. Acestea sunt utilizate în cadrul scufundărilor de sistem, unitare sau în saturație, precum și pentru efectuarea de antrenamente, teste sau tratamente medicale în cazul accidentelor de decompresie.

Alcătuirea constructivă generală și dotările acestor barocamere cuprind: sasul principal, sasul secundar dotat cu instalații sanitare, sasul medical, măștile de palier (măști oro-nazale cu deversor), analizoarele de oxigen și de dioxid de carbon, vanele de alimentare și de evacuare, supapele de siguranță, manometrele pentru controlul presiunii interioare, porțile de acces cu sistem de închidere tip baionetă, cu deschidere spre interior, jupa de cuplare cu barocamera monoloc, hublourile, instalația de iluminat de 24 V, instalația de comunicații radio, instalația de prevenire și stingere a incendiilor și cușeta.

În figurile 2.3 și 2.4 este prezentat ansamblul hiperbar aflat în dotarea Centrului de Scafandri din Constanța, alcătuit dintr-un ansamblu de barocamere și un simulator de scufundare cu apă.



Figura 2.3 Ansamblul hiperbar din dotarea Laboratorului Hiperbar al Centrului de Scafandri Constanța din cadrul Forțelor Navale Române

Ansamblul din dotarea Laboratorului Hiperbar de pe lângă Centrul de Scafandri din Constanța al Forțelor Navale Române, permite efectuarea unor

simulări de scufundare la mare adâncime, nivelul limită de lucru în coloană de apă fiind de 500 m.

Tot în categoria camerelor hiperbare se încadrează și turelele de scufundare și laboratoarele submerse.

Laboratorul Hiperbar este un echipament hiperbar complex alcătuit din două barocamere, fiecare cu câte patru locuri. Acestea comunică, printr-un sas, cu simulatorul vertical de scufundare, în care se pot derula teste de lucru în mediu umed (figura 2.4).

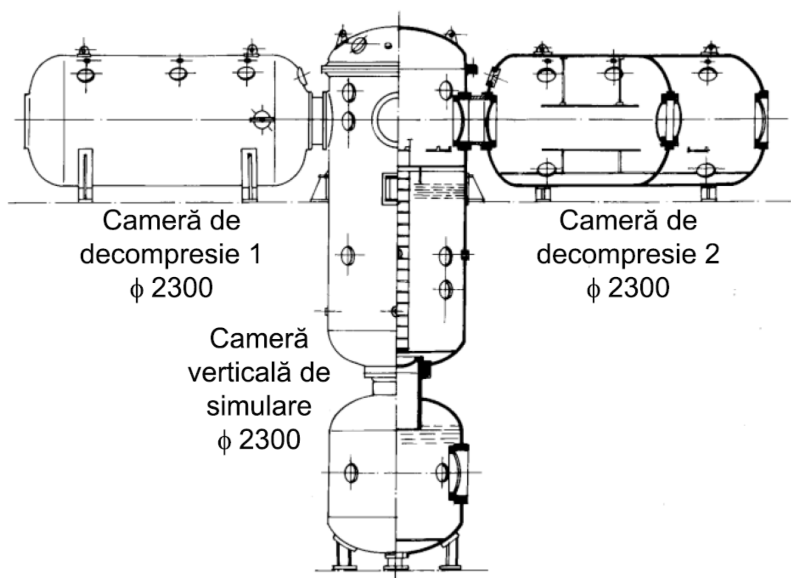


Figura 2.4 Schema complexului de barocamere din Laboratorul Hiperbar de pe lângă Centrul de Scafandri Constanța din cadrul Forțelor Navale Române

2.2.2 Turelele de scufundare

Turelele de scufundare sunt incinte uscate, presurizabile, prin intermediul cărora se efectuează transferul scafandrilor și al echipamentelor necesare în cadrul misiunii, de la suprafață la adâncimea de lucru.

În figura 2.5 este prezentată turela de scufundare închisă aparținând sistemului de scufundare de pe nava „Grigore Antipa" a Centrului de Scafandri Constanța, din cadrul Forțelor Navale Române.

Turelele de scufundare au, cel mai adesea, formă sferică. Corpul lor este protejat cu bare circulare care circumscriu secțiunea cu diametru maxim. Pentru vizualizarea directă a mediului exterior, turela are prevăzute hublouri și un sistem de iluminat cu reflectoare.

Alimentarea cu amestec respirator a turelelor se face, în condiții normale, printr-un sistem ombilical. Cu toate acestea, din motive de siguranță, capsulele au în dotare și rezervoare exterioare cu amestec respirator utilizabile în situații de urgență. În figura 2.5 aceste rezervoare exterioare cu amestec respirator sunt sferele bicolore din zona inelului de protecție superior.

Sistemul ombilical se compune dintr-un furtun pentru alimentarea cu amestec respirator, un furtun pentru alimentarea cu apă caldă folosită pentru încălzirea costumelor și a sistemului de încălzire a amestecului respirator, un profundimetru și un cablu pentru armarea ansamblului format din elementele menționate anterior.

Ca orice incintă hiperbară, turelele de scufundare sunt dotate cu sisteme de presurizare/depresurizare. Acestea sunt reprezentate de supape și vane prin acționarea cărora se reglează presiunea ambientală din interiorul turelei. Verificarea presiunii interioare și exterioare, adică a adâncimii de scufundare, se face prin intermediul unor manometre. Pentru deschiderea porții de acces, amplasată la partea inferioară a turelei de scufundarea, când adâncimea de lucru este atinsă, sunt prevăzute robinete de echilibrare a presiunii.



Figura 2.5 Turela de scufundare închisă aparținând sistemului de scufundare de pe nava „Grigore Antipa” a Centrului de Scafandri Constanța

Deoarece, în procesul respirator, se produce dioxid de carbon, turelele de scufundare sunt dotate cu cartușe filtrante pentru reținerea acestui gaz și cu analizoare de oxigen și dioxid de carbon.

Sistemul electric al turelei de scufundare asigură sursa de energie pentru iluminatul interior și exterior, pentru funcționarea instrumentelor și a sistemului de comunicații și pentru asigurarea confortului termic al scafandrilor. Altfel, în funcție de tipul consumatorilor, există circuite ce asigură tensiuni diferite.

Sistemul de comunicații asigură legătura audio și video între ocupanții turelei și echipa tehnică de suprafață sau între membrii echipei de scafandri aflați în misiune. Pentru comunicare de voce sunt folosite atât sisteme de comunicare prin cablu cât și sisteme „wireless”. Acestea din urmă sunt utilizate ca sistem de comunicare în situațiile de urgență, cum ar fi întreruperea comunicațiilor prin sistemele cu cablu, asigurând legătura între turelă și echipa de la suprafață. Suplimentar, pentru asigurarea comunicațiilor audio în cazul întreruperii energiei electrice, turlele de scufundare sunt dotate cu un sistem de comunicații fără sursă externă de energie, funcționarea acestuia bazându-se doar pe presiunea generată de voce în asociere cu fenomenele fizice produse

prin traductoare electromagnetice. Pentru cazul în care se folosesc amestecuri sintetice care au în compoziție heliu, spre exemplu în cazul folosirii amestecului HELIOX, sistemele de comunicație sunt prevăzute cu decodoare de voce.

Pentru comunicații video există un circuit între turela de scufundare și panoul de comandă aflat la bordul navei sau al platformei pe care se află echipa de suprafață. Camerele video sunt montate, atât în interiorul, cât și în exteriorul turelei.

Turelele de scufundare, în asociere cu barocamerele de punte (chesoanele de scufundare), dispozitivele pentru manevrarea turelei și instalațiile pentru asigurarea condițiilor de viață necesare scafandrilor, formează un sistem de scufundare. Acest sistem complex este folosit pentru scufundări de mare adâncime. Un astfel de sistem de scufundare este prezentat schematic în figura 2.6.

Cu sistemul de scufundare de pe nava ″Grigore Antipa″ a Centrului de Scafandri Constanța, din cadrul Forțelor Navale Române, au fost efectuate scufundări unitare și în saturație, utilizând tehnologii la elaborarea cărora au contribuit și cercetătorii „Colectivului de Inginerie Hiperbară” din cadrul Departamentului de Hidraulică și Protecția Mediului al Universității Tehnice de Construcții București.

O categorie aparte de turele de scufundare îl reprezintă camerele submersibile de decompresie (S.D.C. – Submersible Decompression Chambers). Pe lângă echipamentele prevăzute pentru turelele de scufundare, acestea sunt dotate și cu instalațiile necesare efectuării etapei de decompresie a scafandrilor.

2.2.3 Laboratoarele submerse

Laboratoarele submerse, denumite și case submarine, sunt structuri subacvatice, locuibile, care asigură condițiile necesare vieții și efectuării în bune condiții a activităților specifice misiunii în derulare.

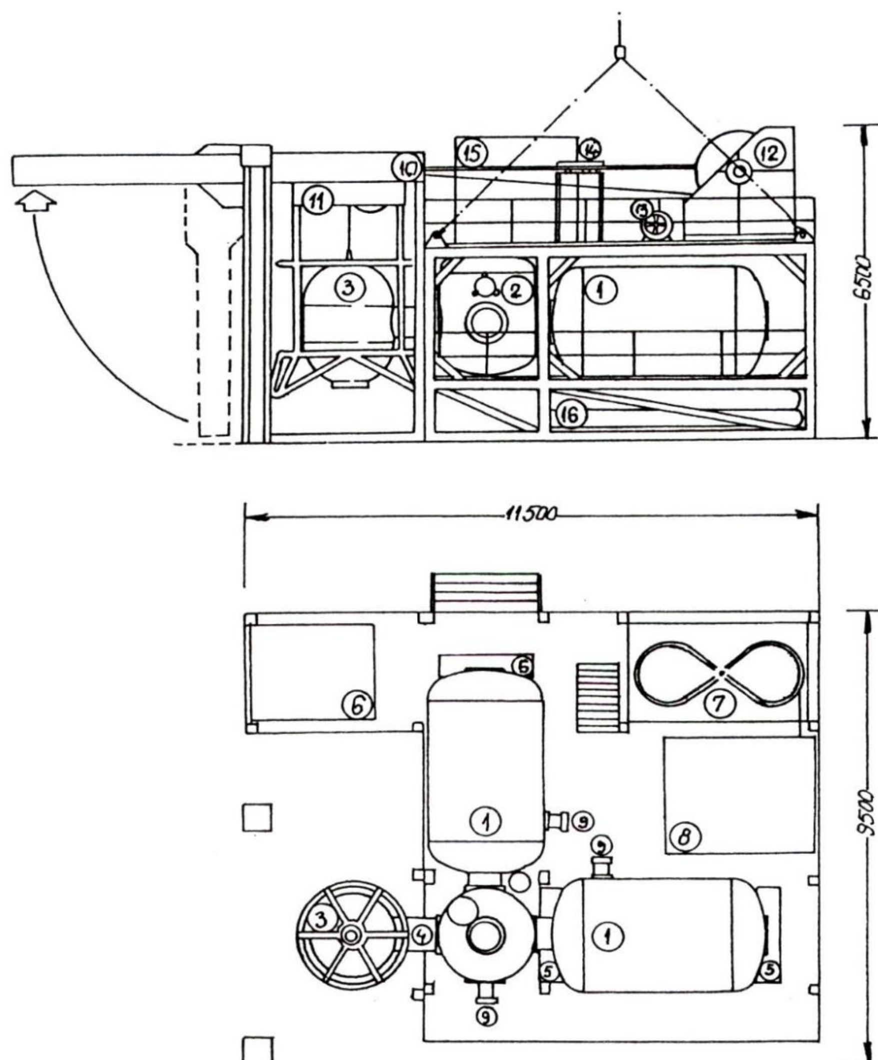
Constructiv, acestea sunt realizate din unul sau mai multe elemente modulare de diverse forme (frecvent cilindrice), unite între ele. Pentru vizualizarea mediului exterior, modulele au prevăzute hublouri.

Circulația scafandrilor spre și dinspre mediul acvatic se face fie prin porți de acces și sasuri intermediare etanșabile fie, în cazul incintelor deschise, direct printr-o poartă amplasată în plan orizontal la partea inferioară a laboratorului. În cel de al doilea caz, presiunea din interiorul casei trebuie să fie egală cu presiunea exterioară.

Astfel, laboratoarele submerse sunt alcătuite din spații cu rol de locuit, pasaje de circulație și dependințe.

Pentru asigurarea condițiilor necesare șederii scafandrilor pe durate lungi de timp, săptămâni sau, în cazuri excepționale, chiar și luni (Tektite I din 1969 durată 60 zile), dotările laboratoarelor submerse cuprind: instalații de alimentare cu amestec respirator de la suprafață și autonome, instalații de purificare și condiționare a atmosferei, sisteme de comunicații, sisteme de alimentare cu

energie electrică de la suprafață și generator de energie electrică operabil în caz de urgență, aparatură de laborator și/ sau unelte.



1 - barocamere; 2 - barocameră de transfer personal; 3 – turelă de scufundare; 4 – manșeta de cuplare a turelei la barocamera de transfer; 5 – încălzitor barocameră; 6- stație de control scufundare; 7- coș stocare ombilical; 8 – stație control barocameră; 9 – sas medical; 10 – portic de manevrare a turelei de scufundare; 11 – troliu; 12 – centrala hidraulică; 13 – vinciuri cu tensiune constantă pentru ghidarea turelei de scufundare; 14 – sistem de ghidare a cablului asociat ombilicalului; 15 – stație de preparare amestecuri respiratorii.

Figura 2.6 Sistemul de scufundare de pe nava „Grigore Antipa” aparținând Centrului de Scafandri Constanța

Echipele de scafandri execută, pe durata șederii în laboratoarele submerse, o scufundare în saturație de adâncime, de lungă durată. Condițiile de presiune din incinta laboratorului sunt așadar similare cu cele ale mediului exterior. Astfel, de-a lungul unei misiuni, membri ai echipei părăsesc incinta,

derulează activitățile programate în mediu umed și apoi revin în laborator pentru odihnă și alte activități cotidiene.

Activitățile subacvatice la care s-au folosit, sau pentru care se pot utiliza, laboratoare submerse sunt:

- prospecțiuni subacvatice de lungă durată;
- recuperări de încărcături din epave;
- ranfluări;
- activități în domeniul extracției petroliere (foraje submarine, construcții și reparații la platforme marine etc.);
- operații de reparare a barajelor;
- observații și cercetări asupra habitatelor, faunei și florei subacvatice.

Pionieri în domeniul laboratoarelor submerse sunt Jaques Yves Cousteau și Edwin Link, care la începutul anilor ’60 au derulat mai multe programe de scufundare în care s-au folosit acest tip de instalații subacvatice complexe.

În România, primele misiuni subacvatice în care s-au utilizat laboratoare submerse au fost efectuate în anul 1968. Ca programe de referință ce au urmat, se menționează experimentele NECTON 78, LACUSTRIS ’94 și LACUSTRIS’95.

Primul laborator submers românesc denumit „LS - 1” (figura 2.7) a fost lansat în lacul Izvorul Muntelui Bicaz. Echipa de scafandri ai stațiunii de cercetare de la Potoci, a efectuat o misiune de 30 zile la adâncimea de 10 m (scufundare în saturație de adâncime), amestecul respirator folosit fiind aer.

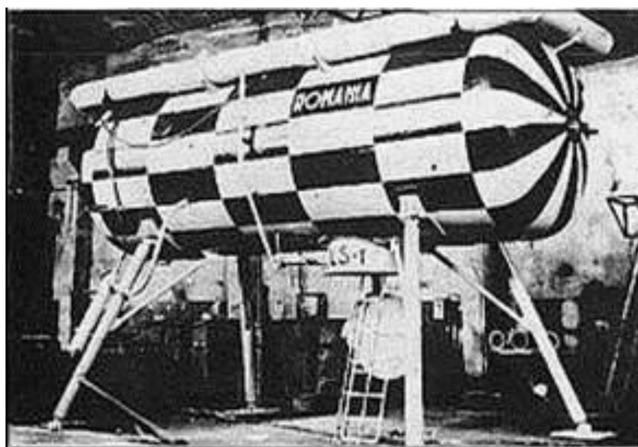




Figura 2.7 Laboratorul submers LS - 1

Laboratorul LS - 1 a fost conceput ca având un diametru de 2 m, o lungime de 5 m și poate găzdui 2 scafandri. În figura 2.8 este prezentată o imagine din interiorul laboratorului LS – 1, fotografie realizată în timpul unuia din programele de cercetare derulate în lacul Izvorul Muntelui Bicaz.



Figura 2.8 Saturație de adâncime – interiorul LS - 1

Un alt laborator submers de concepție românească, prezentat în figura 2.9, este laboratorul LS - 2. Acesta a fost folosit inițial în cadrul diverselor programe de cercetare subacvatică derulate în apele lacului Izvorul Muntelui Bicaz, ulterior fiind mutat pentru a servi la alte programe științifice derulate în Marea Neagră (figura 2.9).



Figura 2.9 Laboratorul submers LS – 2

Colectivul de Inginerie Hiperbară din cadrul Departamentului de Hidraulică și Protecția Mediului din UTCB, a participat la proiectarea și testarea laboratoarelor submerse LS - 1 și LS - 2 utilizate cu succes în seria de programe subacvatice din lacul Izvorul Muntelui-Bicaz.

2.2.4 Submersibilele purtătoare de scafandri

Acest tip de submersibilele sunt destinate transportului scafandrilor putând asigura, totodată, suport tehnic și logistic în derularea operațiunilor subacvatice de mare adâncime. Prin folosirea unor astfel de vehicule se obține o autonomie de scufundare mai mare și, ca în cazul oricărei scufundări de sistem, se asigură un randament crescut pentru operațiunile desfășurate.

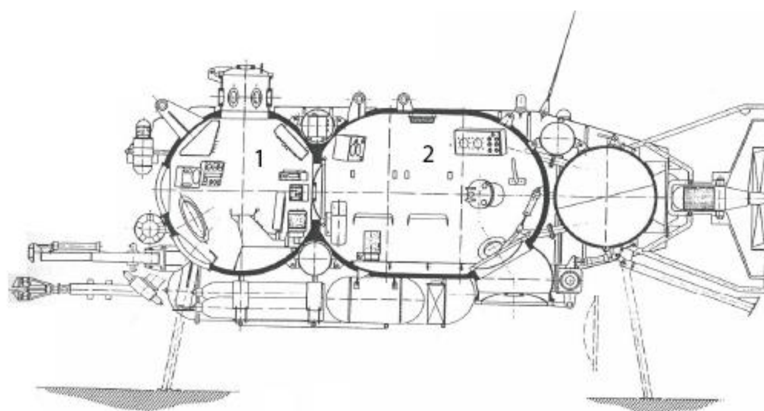
Un minisubmarin tip SM – 358, fabricat de firma franceză COMEX, se găsește în dotarea Centrului de Scafandri Constanța (figura 2.10).



Figura 2.10 Minisubmarinul tip SM - 358 deținut de Centrul de Scafandri Constanța

Minisubmarinul deținut de Centrul de Scafandri Constanța „a fost primul minisubmarin de cercetare și lucru sub apă cu scafandri care a efectuat activități în zona platoului continental românesc al Mării Negre, la adâncime maximă de 187 m".

Acest tip de vehicul se încadrează în categoria submersibilelor purtătoare de scafandri lock-in/ lock-out. O reprezentare schematică a submersibilului tip SM – 358 este prezentată în figura 2.11.



1 – compartiment de pilotaj; 2 - compartiment pentru scafandri

Figura 2.11 Minisubmarinul tip SM - 358 – reprezentare schematică

Caracteristicile tehnice generale ale minisubmarinului SM – 358 sunt:

- adâncime maximă de operare: 300 m;
- gabarit (L; B; H): 7 m; 2,5 m; 2,8 m;
- greutate: 12,5 t;
- viteză: 3 Nd;
- putere: 10 CP;
- echipaj: 5 persoane;
- an construcție: 1978.

Submersibilul este dotat cu propulsie orizontală, cu o elice amplasată în interiorul unui tunel mobil. Autonomia acestui tip de vehicul este de 4 ÷ 8 ore, în funcție de o serie de factori de operare.

Minisubmarinele tip SM – 358 sunt alcătuite din două compartimente principale, unul cu rol de cameră de pilotaj și comandă/control al instalațiilor de bord, cu două locuri, iar cel de al doilea destinat scafandrilor și care are trei locuri.

Deoarece aceste minisubmarine sunt concepute pentru a putea executa scufundări de sistem similare celor în sistem turelă – cheson, compartimentul pentru scafandri este presurizabil și îndeplinește funcții similare unei barocamere multiloc de mici dimensiuni. Acest compartiment asigură așadar posibilitatea derulării fazei de decompresie a scafandrilor, acțiune ce poate continua în condiții de confort și securitate mărită, prin cuplarea minisubmarinului la barocamera din dotarea unei nave suport, după ce submersibilul a fost adus pe punte.

Prin corelarea adâncimii de operare a minisubmarinului cu scopul misiunilor și cu procedeul de scufundare adoptat, se precizează că, folosind acest vehicul, până la adâncimea de 100 m se pot executa scufundări unitare, până la 200 m scufundări în saturație, iar până la 300 m scufundări de observație.

Compartimentul de pilotaj este o incintă uscată în care se găsesc instalațiile și comenzile aferente pentru sistemul de navigație și manevrare, pentru sistemul de comunicații, pentru sistemul hiperbar (compresie/decompresie, alimentarea cu amestec respirator) și pentru sistemul de alimentare cu energie. Minisubmarinul este dotat cu două brațe mobile folosite pentru prindere și pentru lucrul în exterior, comandate tot din interiorul acestui compartiment.

În ceea ce privește conceperea și proiectarea de vehicule subacvatice la nivel național, Colectivul de Inginerie Hiperbară din cadrul Departamentului de Hidraulică și Protecția Mediului din UTCB, a participat, împreună cu alte instituții de prestigiu din România, la un program de cercetare ce a avut ca scop realizarea unui submersibilul purtător de scafandri.

Colectivul de Inginerie Hiperbară a avut ca sarcină proiectarea și testarea prin modelare fizică realizată în tunel aerodinamic a carenei submersibilului denumit AS 125 (figura 2.12) și a echipamentelor de alimentare cu amestec respirator ce deservesc vehiculul.



Figura 2.12 Submersibilul purtător de scafandri AS125.
Modelul pentru teste în tunelul aerodinamic din LAIV-DHPM-UTCB

2.3 APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ UTILIZATE ÎN SCUFUNDAREA PROFESIONALĂ

Necesitatea efectuării de observații și intervenții sub apă în vederea stabilirii existenței resurselor și posibilităților de valorificare a acestora, efectuării de lucrări de foraj și extracție off-shore, realizării și exploatării instalațiilor și construcțiilor subacvatice, precum și în vederea realizării unor misiuni cu caracter militar, a condus la conceperea, proiectarea și realizarea de echipamente specializate pentru pătrunderea omului sub apă și de aparate de respirat sub apă.

2.3.1 Clasificarea echipamentelor de scufundare

Echipamentele pentru pătrunderea omului sub apă*) se pot împărții în două mari categorii:

a) Echipamente care protejează omul de presiunea exterioară a mediului acvatic și care permit omului să respire aer la presiunea atmosferică, acesta nefiind în contact cu mediul acvatic exterior. Din această categorie de echipamente, cunoscute și sub denumirea de *echipamente de scufundare în presiune atmosferică*, fac parte turelele de observație, submarinele, batiscafele și scafandrul rigid;

b) Echipamente cu care omul pătrunde sub apă, în echipresiune cu mediul acvatic exterior. Aceste *echipamente în echipresiune* pot fi împărțite, la rândul lor, în două grupe:

- echipamente în echipresiune în care omul este ferit de agresiunea mediului exterior. Din această grupă de echipamente, denumite echipamente hiperbare, fac parte turelele presurizabile, camerele hiperbare ale submarinelor purtătoare de scafandri și casele (laboratoarele) subacvatice. Aceste echipamente constituie mijloace imersate din care scafandrul poate ieși în mediul acvatic exterior, fără ecluzare.
- echipamente în echipresiune cu ajutorul cărora omul pătrunde nemijlocit în mediul acvatic, presiunea exterioară fiind transmisă direct corpului scafandrului. Aceste echipamente pot, la rândul lor, să fie

*) În lucrare, prin echipamente de pătrundere a omului sub apă se înțelege ansamblul sistemelor hiperbare și instalațiilor aferente, care echipează navele specializate în scufundări, precum și costumele care servesc la echiparea individuală a scafandrilor.

umede (echipamente izotermice din neopren), sau uscate (echipamente cu volum constant), iar scafandrii echipați cu astfel de echipamente pot pătrunde în mediul acvatic fie direct de la suprafață, fie prin intermediul echipamentelor hiperbare în echipresiune care constituie mijloace imersate purtătoare de scafandri.

În tabelul 2.1 sunt prezentate diferite tipuri de echipamente de scufundare proprii diferitelor tipuri de scufundări, corespunzătoare diferitelor adâncimi de intervenție.

Tabelul 2.1 Tabel privind tipul scufundării, amestecul respirator folosit, aplicațiile și echipamentul utilizat, funcție de adâncimea de scufundare

Adâncime a [m]	Presiunea [ata]	Tipul scufundării și amestecul respirator folosit (aplicație)		Echipamentul de scufundare utilizat
0	1	Scufundare cu oxigen (militară)	Scufundare cu aer sau cu amestecuri binare și ternare (sportivă, industrială, militară)	Scafandru greu
10	2			Scafandru autonom Narghilea alimentată de la suprafață
20	3			
30	4			
40	5	Scufundare de adâncime cu aer (sportivă)		
50	6			
60	7			
70	8			
80	9			Turelă de scufundare presurizată, casă submarină, submersibil purtător de scafandri
90	10			
100	11	Scufundare de adâncime cu amestecuri HELIOX. Scufundare profesională unitară*) sau de saturație**)		
110	12			
120	13			Turelă de scufundare plecând din barocamere de punte (pe barje, platforme, nave specializate)
130	14			
140	15			
150	16			
160	17			
170	18			
180	19			
190	20			
200	21			
210	22	Scufundare de mare adâncime cu amestecuri HELIOX sau cu amestecuri TRIMIX Scufundare exclusiv în saturație (industrială, militară)		Sistem hiperbar de saturație alcătuit dintr-un ansamblu de barocamere de punte și turele presurizabile plasate pe nave suport cu poziționare dinamică
•	•			
•	•			
•	•			
500	51			

*) *Scufundarea unitară* în sistem turelă–barocameră este folosită pentru scufundări de adâncime. Peste o anumită adâncime, durata utilă a scufundării devine însă foarte mică în raport cu durata palierelor de decompresie. De aceea, în cazul șantierelor

subacvatice cu durată mare, la adâncime importantă, se preferă scufundarea în saturație.

**) *Scufundarea în saturație*, este tot o scufundare de sistem și constă în presurizarea scafandrilor în barocamere la suprafață, în vecinătatea adâncimii corespunzătoare șantierului subacvatic, transportul acestora cu ajutorul unei turele de scufundare presurizată, lucrul în imersiune și readucerea scafandrilor, sub presiune, în barocamera de la suprafață. Se execută o singură decompresie după terminarea lucrărilor, decompresie ce depinde numai de adâncimea la care s-a efectuat scufundarea.

2.3.2 Clasificarea aparatelor de respirat sub apă

Indiferent de echipamentul utilizat pentru pătrunderea sub apă, scafandrii trebuie să dispună și de aparate de respirat sub apă, utilizate fie pentru salvare, fie pentru evoluția lor în mediul acvatic în scop de explorare sau de intervenție. Cartea de față se va ocupa numai de aparatele de respirat sub apă și, legat de acestea, va aborda și probleme privind mecanica respiratorie, fabricarea amestecurilor respiratorii, expunerea la presiune și decompresia etc.

Clasificarea aparatelor de respirat sub apă se poate face după mai multe criterii. În tabelul 2.2 se prezintă clasificarea aparatelor de respirat sub apă funcție de o serie de criterii determinante.

Tabelul 2.2 Clasificarea aparatelor de respirat sub apă

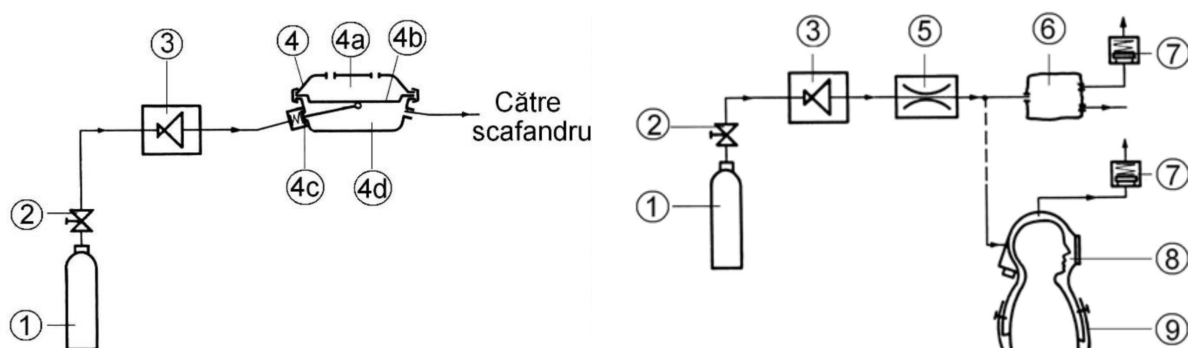
Nr. crt.	Criteriul de clasificare	Tipul de aparat de respirat sub apă
1	Modul de asigurare cu amestec respirator	• aparat autonom • aparat cu alimentare de la suprafață prin ombilical • aparat cu alimentare din mijloace imersate prin ombilical
2	Tipul circuitului realizat de amestecul gazos în aparat	• aparat cu circuit deschis • aparat cu circuit închis • aparat cu circuit semiînchis • aparat cu circuit mixt
3	Modul de livrare a debitului de amestec la consumator)	• aparat cu debit continuu • aparat cu debit la cerere
4	Tipul gazului utilizat	• aparat cu oxigen • aparat cu amestec respirator*) • aparat cu oxigen și cu amestec respirator

Tabelul 2.2 Clasificarea aparatelor de respirat sub apă (continuare)

5	Tipul amestecului respirator utilizat	• aparat cu amestecuri binare (NITROX, HELIOX) • aparat cu amestecuri ternare (TRIMIX)
6	Modul de fabricare al amestecului respirator	• aparat cu amestecare locală • aparat cu amestec prefabricat

*) Amestecurile respiratorii utilizate pentru aparatele de respirat sub apă pot fi amestecuri binare azot-oxigen (N_2-O_2 = NITROX), heliu-oxigen (He-O_2 = HELIOX) și amestecuri ternare heliu-azot-oxigen (He-N_2-O_2 = TRIMIX).

În figura 2.13 se prezintă, pe scurt, caracteristicile aparatelor de respirat sub apă clasificate după două dintre criterii și anume din punct de vedere al modului de asigurare cu amestec respirator și din punct de vedere al modului de livrare a debitului de amestec la consumator.



a – aparat cu debit la cerere

1– butelie de stocaj pentru gazul respirator;
2– robinet de izolare;
3– regulator de presiune treapta I;
4– regulator de presiune treapta a II-a (4a – cameră cu apă, 4b – membrană, 4c – ventil acționat de membrană, 4d – cameră cu gaz);

b – aparat cu debit continuu

5– ajutaj de injecție la debit masic constant;
6– sac respirator;
7– supapă de evacuare;
8– cască;
9– costum de scafandru.

Figura 2.13 Clasificarea aparatelor de respirat sub apă după modul de livrare a debitului de gaz (amestec gazos) respirator către scafandru

2.3.2.1 Clasificarea aparatelor de respirat sub apă din punct de vedere al modului de asigurare cu amestec respirator

Din punct de vedere al modului de asigurare cu amestec respirator se deosebesc: aparatele de respirat sub apă autonome și cele cu alimentare prin ombilical, direct de la suprafață sau din mijloace imersate.

a. Aparate de respirat sub apă autonome

Aparatele de respirat sub apă autonome, sunt aparatele care au în compunere butelii pentru stocarea sub presiune a gazului sau a amestecului gazos respirator necesar unei scufundări. Buteliile de stocaj sunt prevăzute cu instalația specifică de distribuție și control. Cu astfel de aparate se asigură scafandrului autonomia față de suprafață pentru o anumită perioadă de timp care se dorește a fi cât mai mare posibil.

În figura 2.14 se prezintă un scafandru echipat cu un aparat de respirat sub apă autonom, cu circuit deschis și debit la cerere tip Dräger.

Optimizarea funcționării unui aparat de respirat sub apă autonom presupune realizarea următoarelor deziderate:

- adâncime de scufundare cât mai mare;
- timp de lucru în imersie, t_ℓ, îndelungat;
- timp de revenire la presiunea atmosferică (timp de decompresie), t_d, cât mai mic.

Dezideratele enumerate mai sus nu sunt compatibile, astfel încât dacă se reușește rezolvarea a două dintre ele, cel de al treilea se opune. În consecință, aparatele de respirat sub apă autonome trebuie să admită un compromis între aceste deziderate. După cum se cunoaște, pentru o anumită adâncime de scufundare, timpul de lucru sub apă t_ℓ și timpul de decompresie t_d, împreună cu timpul de coborâre a scafandrului la adâncimea de lucru t_c, definesc randamentul scufundării η_s care are expresia $\eta_s = t_\ell / (t_c + t_\ell + t_d)$ și care se dorește a fi cât mai ridicat.

b. Aparate de respirat sub apă cu alimentare prin ombilical

Aparatele de respirat sub apă cu alimentare prin ombilical, se caracterizează prin aceea că amestecul respirator este livrat către scafandru prin intermediul unui furtun de alimentare. Aceste aparate se folosesc fie cu alimentare direct de la suprafața apei, fie cu alimentare din diferite mijloace imersate, echipamente hiperbare aflate în echipresiune cu mediul acvatic exterior, cum ar fi turele de scufundare presurizabile, barocamere aferente submersibilelor purtătoare de scafandri, case subacvatice și laboratoare submerse.

În figura 2.15 se prezintă un scafandru echipat cu un aparat de respirat sub apă cu alimentare prin ombilical, de la suprafață, tip Dräger.



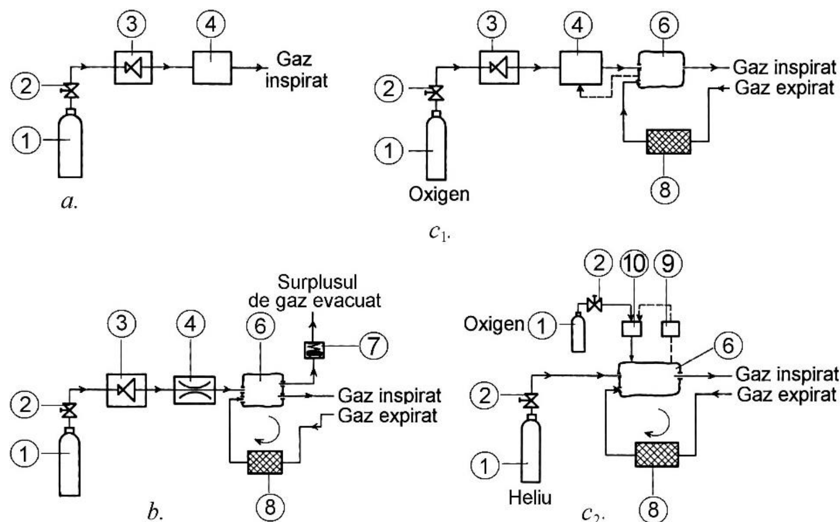
Figura 2.14 Scafandru echipat cu un aparat de respirat sub apă autonom, cu circuit deschis și debit la cerere, tip Dräger.



Figura 2.15 Scafandru echipat cu un aparat de respirat sub apă cu alimentare prin ombilical, de la suprafață, tip Dräger.

2.3.2.2 Clasificarea aparatelor de respirat sub apă din punct de vedere al circuitului realizat de amestecul respirator în cadrul aparatului

Din punct de vedere al circuitului realizat de amestecul respirator în cadrul aparatului, în procesul respirației, aparatele de respirat sub apă pot fi împărțite în patru categorii principale și anume: cu circuit deschis, închis, semiînchis (figura 2.16) și mixt.



a – aparat cu circuit deschis; *b* – aparat cu circuit semiînchis; c_1 – aparat cu circuit închis cu oxigen; c_2 – aparat cu circuit închis cu amestec de gaze;
1– butelie de stocaj pentru gazul (amestecul de gaze) respirator; 2– robinet de izolare; 3– regulator de presiune treapta I; 4– regulator de presiune treapta a II-a; 5– ajutaj de injecție la debit masic constant; 6– sac respirator; 7– supapă de evacuare; 8– cartuș epurator (absorber CO_2); 9– traductor de presiune parțială a oxigenului; 10– dispozitiv de injecție pentru oxigen.

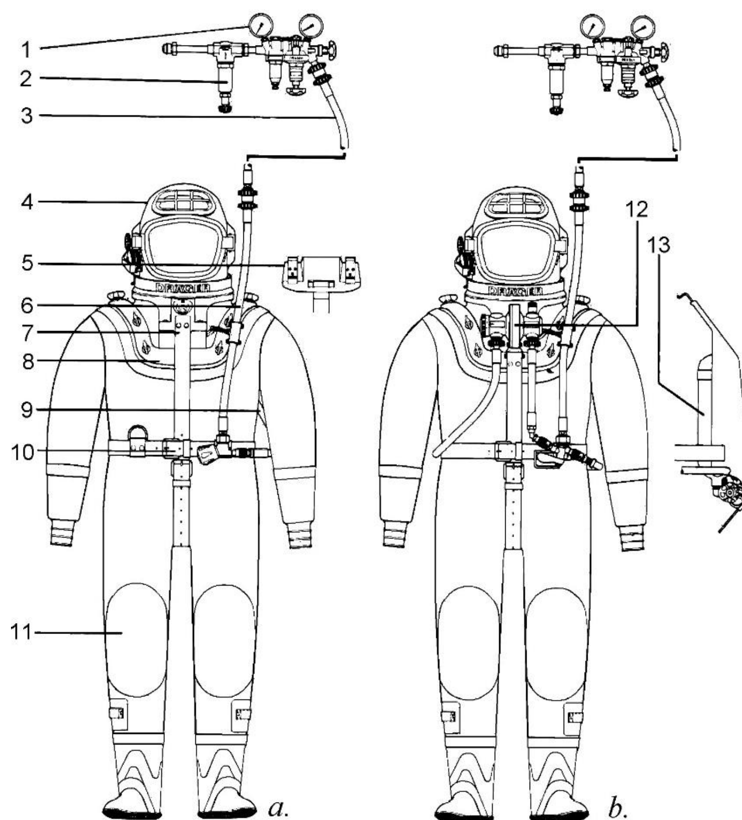
Figura 2.16 Clasificarea aparatelor de respirat sub apă după tipul circuitului realizat de gazul (amestecul de gaze) respirator în aparat

a. Aparate de respirat sub apă cu circuit deschis

Aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis (figura 2.16,*a*), sunt aparatele la care întregul amestec gazos, rezultat din expirație, este evacuat în mediul acvatic exterior.



Figura 2.17 Scafandru greu echipat cu aparat de respirat sub apă, cu circuit deschis, cu debit continuu, DM 200.



1– reductor presiune treapta a II-a; 2– filtru din metal sinterizat; 3– furtun de alimentare; 4– cască rigida; 5– lest de spate; 6– furtun de legătură; 7– lest de piept; 8– guler; 9– furtun de legătură la cască; 10– centură cu robinet cu control manual; 11– costum pentru scafandru greu; 12– dispozitiv automat de control a scufundării; 13– rezervă pentru alimentare cu aer.

Figura 2.18 Schemele aparatelor de respirat sub apă pentru scafandru greu, DM 200; *a.* Aparatul DM 200/1; *b.* Aparatul DM 200/2

Aceste aparate sunt alcătuite din buteliile de stocaj pentru rezerva de gaz sau de amestec gazos respirator înmagazinate sub presiune, atunci când aparatele sunt autonome, și dintr-un regulator de presiune care asigură respirația la o presiune egală cu presiunea corespunzătoare adâncimii de imersie. Autonomia acestor aparate este relativ redusă. Atunci când se dorește ca timpul de imersie să fie mai mare, se utilizează aparate de respirat sub apă cu circuit deschis alimentate cu aer sau cu amestec gazos sintetic de la suprafață sau dintr-un mijloc imersat. Adâncimea de scufundare cu aparatele în circuit deschis este relativ mare, până la 50…75 m. Aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis sunt la rândul lor de două feluri:

- aparate cu circuit deschis, cu debit continuu (figura 2.17 și figura 2.18);
- aparate cu circuit deschis, cu debit la cerere (figura 2.19 și figura 2.20).



Figura 2.19 Scafandri echipați cu aparate de respirat sub apă cu circuit deschis, cu debit la cerere și cu alimentare de la suprafață PL 70.

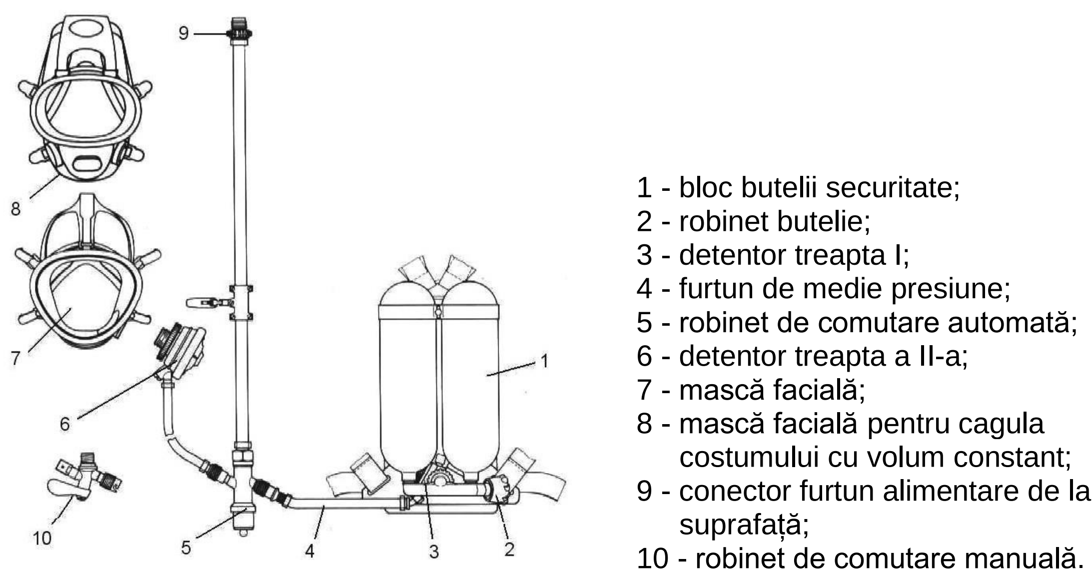


Figura 2.20 Schema aparatului de respirat sub apă cu circuit deschis, cu alimentare de la suprafață, PL 70

În figura 2.21 se prezintă schematic caracteristicile și performanțele aparatelor de respirat sub apă cu circuit deschis.

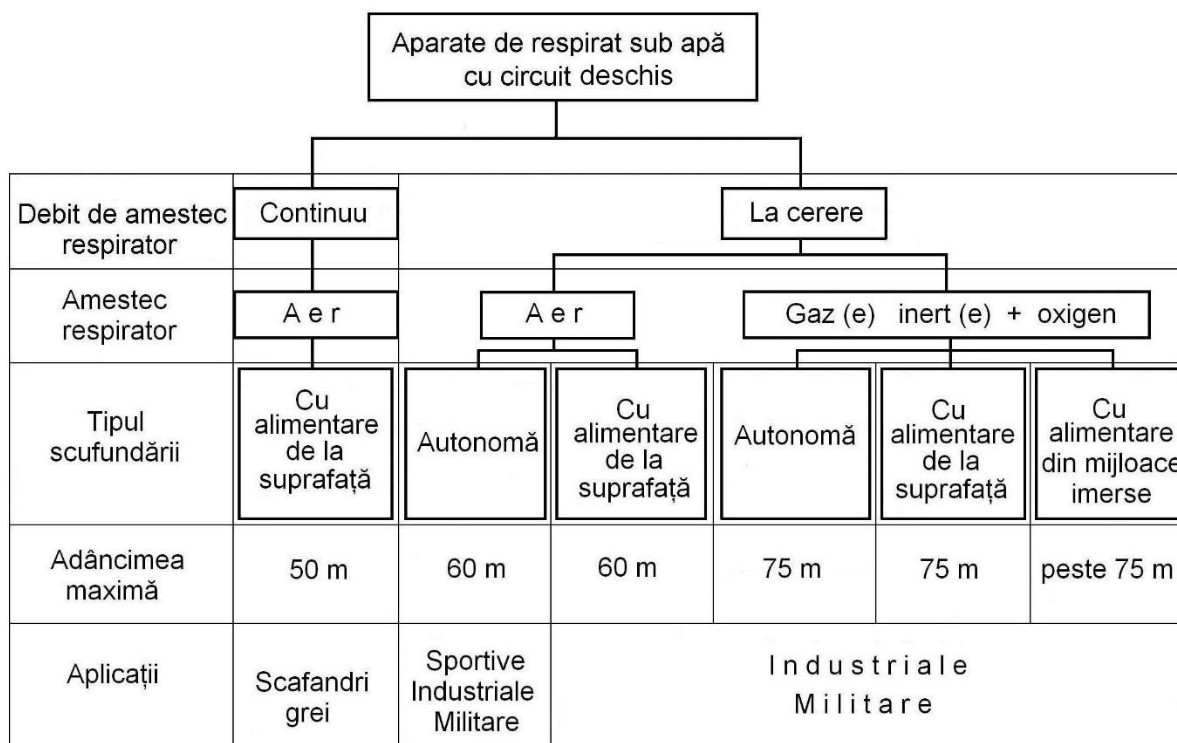


Figura 2.21 Schema generală cu caracteristicile, performanțele și domeniile de aplicare pentru aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis.

b. Aparate de respirat sub apă cu circuit închis

Aparatele de respirat sub apă cu circuit închis, sunt aparatele, la care întregul amestec gazos rezultat prin expirație este recirculat, o parte din amestec (dioxidul de carbon) fiind reținută în cartușul epurator (absorberul de CO_2) aferent aparatului, cealaltă parte fiind reciclată. Aceste aparate sunt autonome și sunt alcătuite din butelia de stocaj cu oxigen sau cu amestec gazos respirator, dintr-un reductor de presiune treapta I, care reduce presiunea oxigenului sau amestecului respirator de la presiunea înaltă din butelie la o presiune medie și dintr-un sac respirator funcționând ca un reductor treapta a II-a ce permite reducerea presiunii de la valoarea medie la o valoare corespunzătoare adâncimii de imersie. Aparatele de respirat sub apă cu circuit închis pot livra oxigenul sau amestecul respirator fie continuu, fie la cerere. Atunci când aceste aparate utilizează amestec respirator, acesta poate fi realizat prin amestecare locală sau poate fi prefabricat. Autonomia acestor aparate este foarte ridicată. Adâncimea maximă teoretică de lucru la aparatele cu circuit închis este de 6,5 m pentru aparatele cu oxigen (pentru scufundări cu oxigen cu durată relativ scurtă, adâncimea de scufundare poate crește până la 10 m și chiar mai mult pentru incursiuni cu durată foarte mică) și mai mare pentru

aparatele cu amestec. Prin urmare, aparatele de respirat sub apă cu circuit închis pot fi de două feluri:

- aparate cu circuit închis, cu oxigen (figura 2.22 și figura 2.23);
- aparate cu circuit închis, cu amestec (figura 2.24).



Figura 2.22 Aparatul de respirat sub apă cu circuit închis, cu oxigen, LAR VI, Dräger.

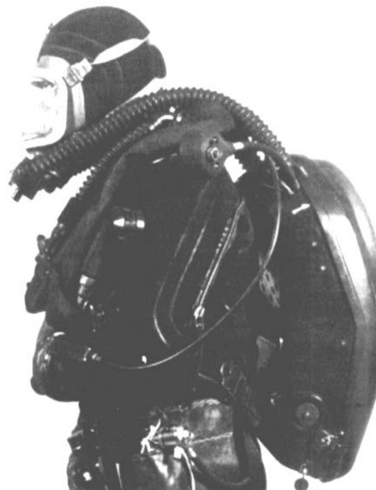
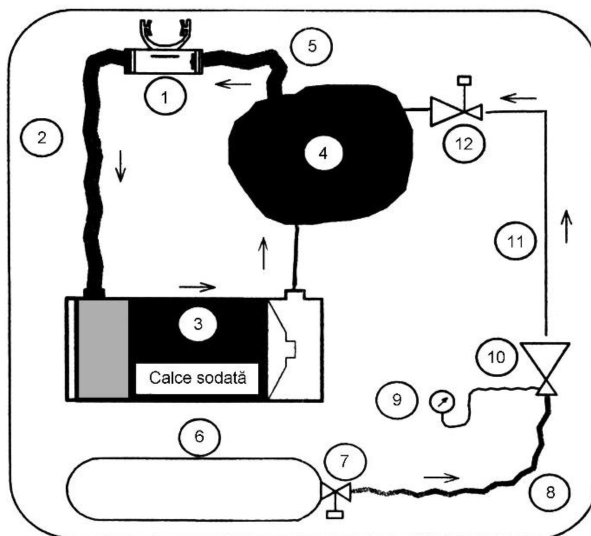


Figura 2.24 Scafandru militar echipat cu aparat de respirat sub apă, cu amestec, în circuit închis, MK 15, Dräger.



1– piesă bucală cu muștiuc; 2– furtun de expirație; 3– cartuș epurator pentru CO_2; 4– sac respirator; 5– furtun de inspirație; 6– butelie cu oxigen; 7– robinet butelie; 8– linia de înaltă presiune; 9– manometru de înaltă presiune; 10– reductor de presiune (detentor treapta I); 11– linia de medie presiune; 12– valvă cu deschidere la cerere (detentor treapta a II-a).

Figura 2.23 Schema circuitului de gaz pentru aparatul cu oxigen, în circuit închis, LAR VI

În figura 2.25 se prezintă o schemă generală cu caracteristicile și performanțele aparatelor de respirat sub apă cu circuit închis.

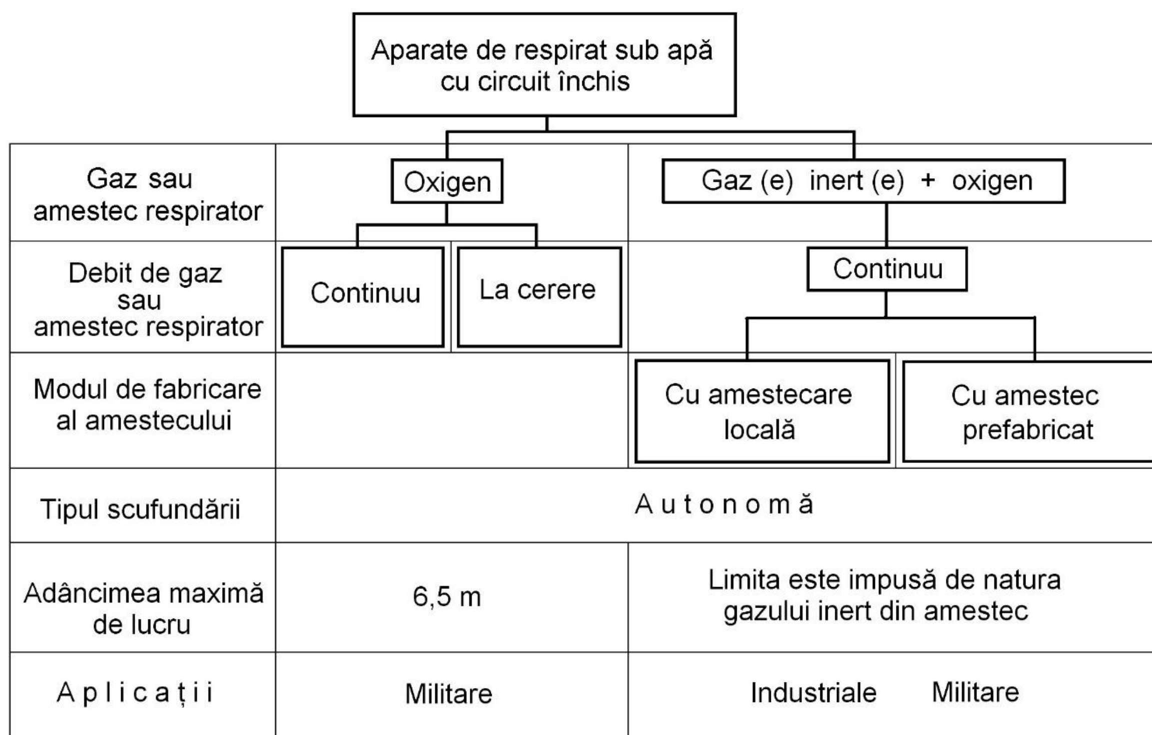


Figura 2.25 Schema generală cu caracteristicile, performanțele și domeniile de aplicație pentru aparatele de respirat sub apă cu circuit închis.

c. Aparate de respirat sub apă cu circuit semiînchis

Aparatele de respirat sub apă cu circuit semiînchis, sunt aparatele la care o parte din amestecul gazos expirat este evacuat în mediul acvatic exterior, cealaltă parte fiind reciclată și reintrodusă în circuitul de respirație după ce a fost trecută printr-un cartuș epurator unde a fost reținut dioxidul de carbon. Aceste aparate sunt alcătuite din butelii de stocaj cu amestecuri binare azot–oxigen (NITROX) sau heliu–oxigen (HELIOX), sau cu amestecuri ternare TRIMIX, (He–N_2–O_2 sau Ne–N_2–O_2), regulator de presiune treapta I, sac respirator și sistem de livrare automată a debitului de amestec respirator către consumator. Aceste aparate, atunci când sunt autonome, sunt caracterizate printr-o autonomie ridicată și printr-un randament al scufundării crescut. Atunci când se dorește un timp de scufundare mai ridicat, se procedează la alimentarea cu amestec respirator sintetic de la suprafață sau dintr-un mijloc imersat, realizându-se prin aparatul cu circuit semiînchis o economie de amestec respirator. Adâncimea maximă de scufundare cu astfel de aparate este de 54 m în cazul utilizării amestecurilor NITROX și peste 54 m în cazul utilizării amestecurilor HELIOX sau TRIMIX.

Funcție de modul de preparare a amestecului respirator, aparatele de respirat sub apă cu circuit semiînchis pot fi:

- aparate cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat (figura 2.26);

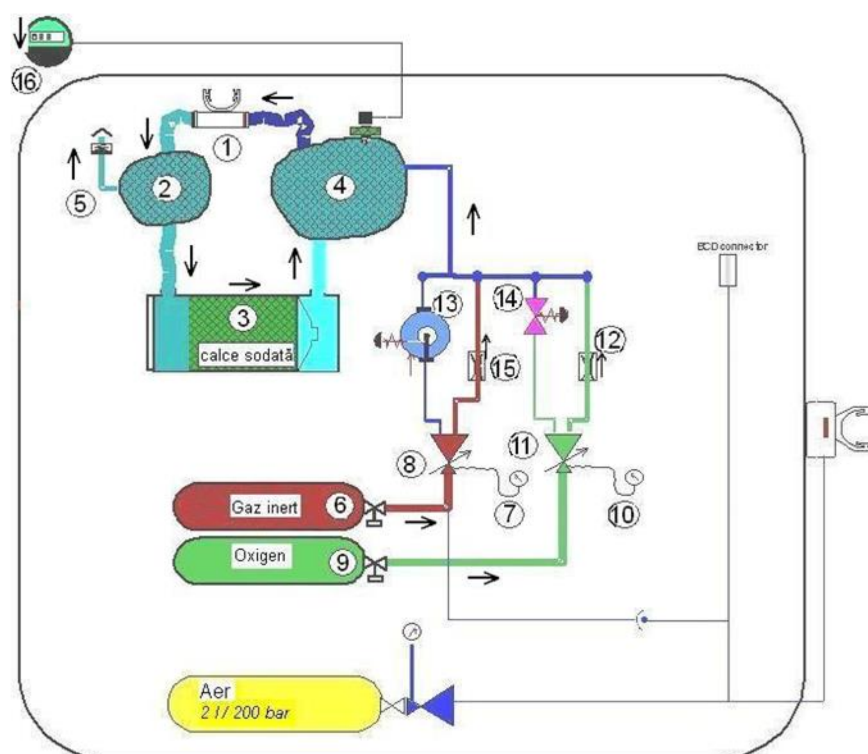
- aparate cu circuit semiînchis, cu amestec preparat local (figura 2.27 și figura 2.28).



Figura 2.26 Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, ATLANTIS I, Dräger.



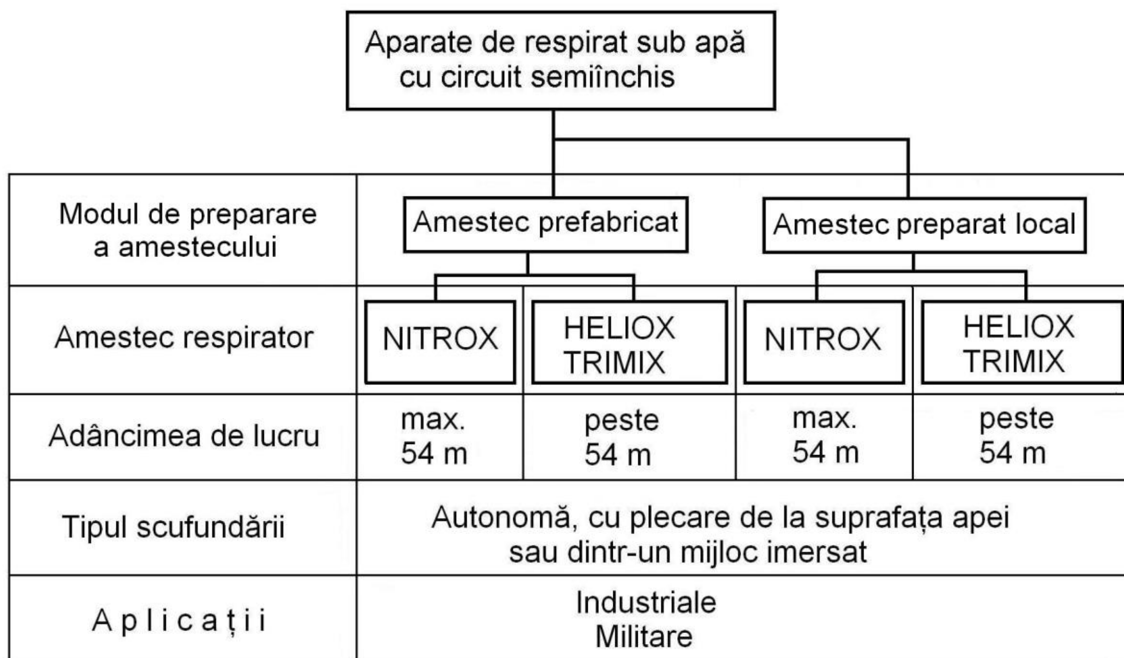
Figura 2.27 Scafandru militar echipat cu aparatul de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu amestec preparat local, SMT, Dräger.



1– piesă bucală cu muștiuc; 2– sac de expirație; 3– cartuș epurator pentru CO_2; 4– sac de inspirație; 5– supapă de evacuare; 6– butelie gaz inert; 7– manometru butelie gaz inert; 8– reductor de presiune pe gaz inert; 9– butelie oxigen; 10– manometru butelie oxigen; 11– reductor de presiune pe oxigen; 12, 13, 14, 15– dispozitiv de injecție, completare și corectare; 16– indicator de oxigen

Figura 2.28 Schema de principiu a aparatului SMT

În figura 2.29 este prezentată o schemă conținând caracteristicile generale și performanțele aparatelor de respirat sub apă cu circuit semiînchis.



NITROX = amestec binar azot–oxigen (N_2–O_2);
HELIOX = amestec binar heliu–oxigen (He–O_2);
TRIMIX = amestec ternar heliu–azot–oxigen (He–N_2–O_2).

Figura 2.29 Schema generală cu caractersiticile, performanțele și domeniile de aplicație pentru aparatele de respirat sub apă cu circuit semiînchis.

d. Aparate de respirat sub apă cu circuit mixt

Aparatele de respirat sub apă cu circuit mixt, sunt aparatele care funcționează, de regulă, în circuit închis cu oxigen până la adâncimea de 6,5 m (și chiar până la adâncimi de 15…20 m pentru incursiuni de scurtă durată) și în circuit deschis sau semiînchis, cu amestec respirator gazos, peste aceste adâncimi, fără a depăși adâncimea de 54 m pentru NITROX. Aceste aparate au în componență elementele caracteristice ale aparatelor cu circuit închis, deschis sau semiînchis, combinând totodată avantajele acestor aparate. Scopul principal al realizării unor astfel de aparate îl reprezintă obținerea unui randament al scufundării η_s foarte ridicat prin reducerea la maxim a timpului de decompresie, t_d .

În figurile 2.30 și 2.31 este prezentat aparatul de respirat sub apă cu circuit mixt LAR VII Combi fabricat de firma DRÄGER.

Aparatele de respirat sub apă a căror clasificare a fost prezentată mai sus sunt astfel concepute încât să poată fi utilizate cu precădere pentru anumite domenii. Astfel, alegerea unui tip sau altul de aparat de respirat sub apă se va face funcție de caracteristicile scufundării (adâncime, timp de expunere la presiune, temperatura apei), de nivelul de efort al scafandrului în timpul activității subacvatice, de autonomia necesară, de randamentul scufundării, precum și de sensibilitatea și gradul de antrenament ale scafandrului.

Ținând cont de tipul de calificare al scafandrului, se poate arăta faptul că, în timp ce aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis, autonome și cu debit de aer la cerere pot fi utilizate de către toate categoriile de scafandri, celelalte categorii de aparate sunt interzise amatorilor, ele fiind destinate numai scafandrilor profesioniști. Dar, chiar și din rândul profesioniștilor, cei care desfășoară activități cu caracter civil nu pot utiliza aparate de respirat sub apă cu oxigen sau cu amestecuri supraoxigenate, acestea fiind destinate numai scafandrilor militari, adică scafandrilor de luptă și respectiv, scafandrilor deminori, selecționați în urma unor teste speciale așa cum este *testul oxigenului* și beneficiind de antrenamente riguroase.



Figura 2.30 Scafandru militar echipat cu aparat de respirat sub apă cu circuit mixt, LAR VII Combi, Dräger.

În raport cu aparatele de respirat sub apă în circuit deschis, a căror utilizare comportă un nivel ridicat de securitate, celelalte aparate comportă diferite niveluri de risc în raport cu diferitele tipuri de accidente (hipoxie, hiperoxie, intoxicație cu CO_2). Astfel, în tabelul 2.3 sunt prezentate nivelurile de risc pentru diferite tipuri de aparate de respirat sub apă, la diferitele tipuri de accidente de scufundare; punctajul având următoarea semnificație:

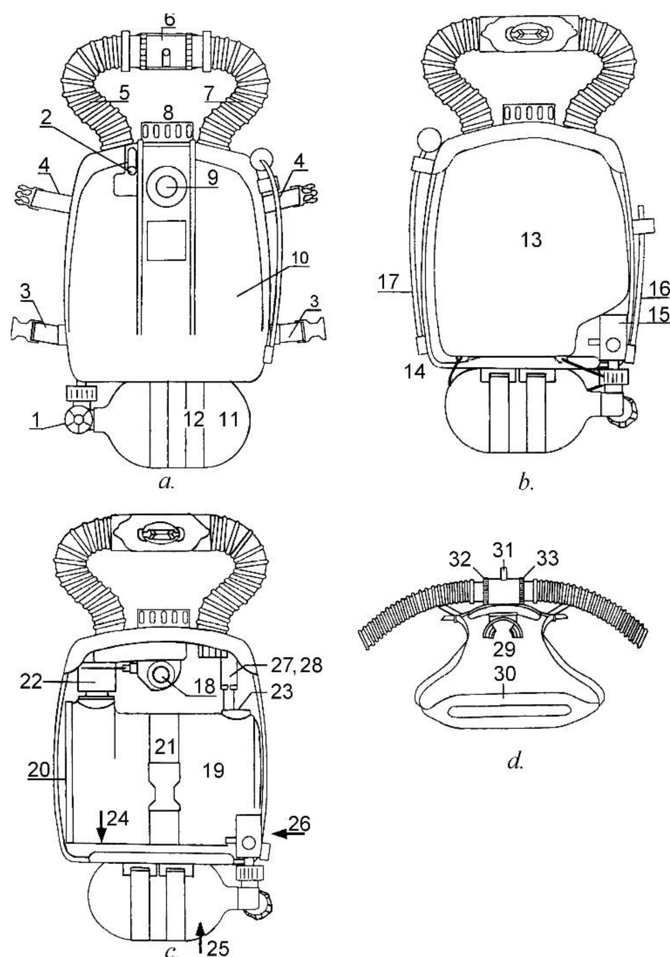
1 – risc minim, datorat unor erori grosolane;
2 – risc moderat;
3 – risc considerabil, dar previzibil;
4 – risc maximal (acceptabil ca risc calculat);
5 – risc inacceptabil.

Apare evident riscul mai mare la utilizarea aparatelor de respirat sub apă în circuit închis cu oxigen. Toate aceste riscuri sunt riscuri calculate care pot fi diminuate considerabil prin elaborarea unor instrucțiuni de utilizare adecvate și printr-un antrenament foarte serios al scafandrilor.

Nivelurile de risc considerabile sunt motivele pentru care aparatele de respirat sub apă în circuit semiînchis și închis sunt aparate speciale, ce pot fi utilizate numai de scafandrii profesioniști și mai ales de scafandrii militari.

Pentru o mai bună înțelegere a funcționării aparatelor de respirat sub apă, a performanțelor acestora, precum și a necesității utilizării lor, este necesar să se îndrepte atenția asupra sistemului pe care îl formează omul împreună cu

aparatul. La domeniul pătrunderii omului sub apă interesează, mai mult decât în orice alt domeniu, interacțiunile dintre mediul acvatic și sistemul om-aparat, dintre mediul acvatic și fiecare subsistem (om și aparat) precum și interacțiunea între elementele subsistemului (între om și aparat), precum și corelarea acestora în condițiile regimului hiperbar.



a. Vedere frontală: 1– robinetul buteliei de oxigen; 2– comutator manual; 3– catarame inferioare pentru hamuri; 4– catarame superioare pentru hamuri; 5– furtun de inspirație; 6– robinet rotativ manual; 7– furtun de expirație; 8– supapă de evacuare la suprapresiune; 9– valvă de by-pass; 10– carcasă; 11– butelie cu oxigen; 12– curele prindere butelie;

b. Partea din spate cu sacul respirator: 13– sacul respirator; 14– cablu din cauciuc; 15– reductor de presiune pentru oxigen; 16– conductă racord la butelia cu amestec; 17– manometru pentru presiunea din butelie;

c. Partea din spate fără sacul respirator: 18– automat pulmonar; 19– cartuș epurator pentru CO_2; 20– capac; 21– curea de susținere; 22– distribuitor; 23– racord pentru sacul respirator; 24– plăcuță identificare aparat; 25– plăcuță identificare butelie; 26– plăcuță identificare reductor de presiune; 27– bloc comutare; 28– unitate de dozare;

d. Piesa bucală: 29– muștiuc; 30– bandă pentru cap; 31– manetă robinet rotativ; 32– supapă de expirație; 33– supapă de inspirație.

Figura 2.31 Schema aparatului LAR VII Combi cu elementele componente principale

Tabelul 2.3 Nivelurile de risc pentru aparatele de respirat sub apă în raport cu diferite tipuri de accidente

Aparate de respirat sub apă		Nivelurile de risc pentru accidente		
		Hipoxie	Hiperoxie	Intoxicație cu CO_2
În circuit deschis	- cu debit continuu	1	1	1
	- cu debit la cerere	1	1	1
În circuit semiînchis, autonome	- cu debit masic contant de amestec	3	2	2
	- cu debit masic constant de oxigen	5	3	2
În circuit semiînchis, cu alimentare de la suprafață	- cu debit masic constant de amestec	4	2	2
	- cu debit masic constant de oxigen	4	3	2
În circuit închis, cu oxigen	- cu debit la cerere	2	4-5	2
	- cu injecție constantă	3	4-5	2
	- cu injecție manuală intermitentă	4	4-5	2
În circuit închis, cu amestec	- cu senzori electrochimici de O_2	3	2	2
	- cu debit volumic constant	5	3	2

3

EXPUNEREA LA PRESIUNE ȘI DECOMPRESIA SCAFANDRILOR

În timpul pătrunderii omului sub apă au loc următoarele procese:

- *expunerea organismului uman la presiunea exterioară*, timp în care omul respiră un amestec gazos la o presiune corespunzătoare adâncimii scufundării; gazul inert (în cazul amestecurilor binare) sau gazele inerte (în cazul amestecurilor ternare) din compoziția amestecului respirator sunt transportate în biomasa organismului și se dizolvă în țesuturi;
- *revenirea la presiunea atmosferică (decompresia)*, timp în care gazul sau gazele inerte, dizolvate în țesuturi pe timpul expunerii la presiune, sunt eliminate. Eliminarea trebuie să aibă loc astfel încât să nu se formeze bule de gaz periculoase.

3.1 GENERALITĂȚI PRIVIND EXPUNEREA LA PRESIUNE ȘI REVENIREA LA PRESIUNEA ATMOSFERICĂ A SCAFANDRULUI

Expunerea la presiune a scafandrului poate fi de scurtă durată (cazul scufundărilor unitare) sau de lungă durată (cazul scufundărilor în saturație). Funcție de durata de expunere la presiune, țesuturile organismului absorb o anumită cantitate sau se saturează cu gazul sau gazele inerte din componența amestecului respirator.

Expunerea la presiune a scafandrului se realizează în primele două etape ale scufundării și anume în *etapa coborârii la adâncimea de lucru (compresiei) și în etapa lucrului efectiv sub apă (staționării la nivelul de lucru).*

Pentru calcularea unui procedeu de revenire la presiunea atmosferică (decompresie), ce constă în stabilirea vitezelor de reducere a presiunii (urcare spre suprafața apei), adâncimii corespunzătoare palierelor de decompresie precum și timpului de staționare la aceste paliere, este necesară cunoașterea presiunii gazului sau a gazelor inerte dizolvate în țesuturile organismului pe timpul expunerii acestuia la presiune. Din considerente operaționale, se impune ca scafandrul să revină la presiunea atmosferică în orice situație legată de starea mării și de temperatura apei, într-un timp cât mai scurt posibil și cu riscuri minime de accidente.

Problema fundamentală legată de calculul procedeelor de scufundare, constă în alegerea modelului matematic al transportului de gaze inerte în țesuturile organismului uman. Acest model matematic trebuie să îndeplinească două criterii cheie:

- să fie în măsură de a furniza o relație adecvată limitelor impuse de scufundările operaționale;
- să permită perfecționări, în urma culegerii de date din scufundările experimentale, pentru creșterea probabilității succeselor în readucerea scafandrilor la presiunea atmosferică, în condițiile în care parametrii presiune de expunere, timp de expunere și compoziție a amestecurilor respiratorii utilizate sunt modificați.

La decompresie, gazele inerte dizolvate în țesuturile organismului scafandrului se degajă și se elimină prin plămâni. Această degajare poate avea loc în două moduri:

- prin trecerea directă a gazelor inerte din faza dizolvată în faza gazoasă la nivelul frontierelor alveolo-capilare; este ceea ce se numește transport monofazic și corespunde decompresiilor corecte, nepatogene, oferite de tabelele de decompresie;
- prin trecerea gazelor inerte, sub formă de bule, în țesuturi și în sânge; acesta este modul cel mai periculos de transport și corespunde transportului bifazic; totuși, transportul bifazic bine controlat, poate asigura și el revenirea în bune condiții a scafandrului la presiunea atmosferică.

3.2 EXPUNEREA ORGANISMULUI SCAFANDRULUI ÎN CADRUL PRIMELOR DOUĂ FAZE ALE PROCESELOR HIPERBARE CU AER ȘI AMESTECURI RESPIRATORII SINTETICE, BINARE ȘI TERNARE

Activitatea subacvatică este reglementată de tabele de scufundare care indică modul cum trebuie efectuată fiecare etapă a scufundării, cu limitele de timp și de adâncime respective. Pentru a se putea calcula o astfel de tabelă, trebuie bine cunoscute fenomenele fizice care au loc în organismul uman pe timpul expunerii în cadrul proceselor hiperbare cu aer sau cu amestecuri respiratorii sintetice, timp în care omul respiră un amestec gazos sub presiune. Este cunoscut faptul că organismul uman este format din schelet, ca parte solidă, grăsimi, parte unde solvenții nepolari sunt preponderenți, sânge și mușchi, parte unde solventul majoritar este apa. Aceste elemente formează în unele locuri ca plămâni, sinusuri frontale și parietale, ureche medie etc., cavități gazoase. În concluzie, corpul omenesc ar putea fi considerat, în mod simplist, ca fiind format din părți solide, lichide și gazoase.

Deoarece părțile solide și lichide pot fi considerate incompresibile, numai umplerea cavităților gazoase ale organismului cu amestec respirator la presiunea hidrostatică corespunzătoare adâncimii scufundării asigură pătrunderea omului sub apă, neprotejat, la adâncimi mari. Această umplere a cavităților gazoase se realizează prin intermediul căilor respiratorii, omul fiind alimentat din aparate de respirat sub apă speciale, portabile sau nu, cu debit la

cerere sau continuu, cu amestec gazos respirator la presiuni și debite corespunzătoare adâncimilor de lucru. Deoarece oxigenul este gazul care asigură arderile metabolice, fiind considerat consumabil, singurul gaz care este luat în considerare pentru calculul tabelelor de decompresie este gazul inert sau gazele inerte din compunerea amestecurilor respiratorii.

Expunerea organismului uman la procesele hiperbare cu aer sau cu amestecuri respiratorii sintetice, specifice pătrunderii omului sub apă, se realizează în două faze: *compresia (presurizarea)* și *lucrul efectiv sub presiune* la adâncimea maximă a scufundării. Funcție de durata expunerii organismului uman la presiunea ambiantă se disting trei tipuri de scufundări: scufundări cu expuneri de scurtă, de medie și de lungă durată. Cunoscut fiind faptul că organismul uman a fost împărțit, în mod formal, în compartimente de țesuturi a căror perioadă de semisaturație variază de la câteva minute la câteva sute de minute, se poate face o corelație între perioada lor de semisaturație și timpii de expunere la presiune. Astfel, *expunerea de scurtă durată* ar corespunde saturării compartimentelor de țesuturi cu perioada de semisaturație de până la 80 minute (cazul *scufundărilor unitare autonome*). *Expunerea cu durată medie* ar corespunde saturării compartimentelor de țesuturi cu perioada de semisaturație de până la 120 minute (cazul *scufundărilor unitare profunde de sistem*). *Expunerea de lungă durată* ar corespunde saturării compartimentelor de țesuturi cu perioada de semisaturație de peste 120 minute (cazul *scufundărilor în saturație*).

3.2.1 Compresia scafandrului

Compresia scafandrului se materializează prin procesele hiperbare care au loc pe timpul cât scafandrul este presurizat sau coboară până la adâncimea de lucru. În cazul scufundărilor unitare, timpul necesar compresiei (coborârii la adâncimea de lucru) se adaugă la durata totală a scufundării și se ia în calcul la stabilirea procedeului de revenire la presiunea atmosferică. Din acest motiv, pentru scufundări unitare, viteza compresiei (de coborâre în imersiune) este importantă și trebuie să fie cât mai mare posibil.

În cazul scufundărilor unitare autonome, timpul de lucru în imersiune fiind limitat, scafandrul trebuie să coboare cu viteze relativ mari, viteze ce pot atinge valori de până la 30 m/min. Aceleași viteze de compresie se ating și în cazul scufundărilor unitare de sistem, până la adâncimi de 100 m. Între 100 m și 180 m adâncime vitezele de compresie se reduc la 15 m/min până la 20 m/min. Pentru scufundări în saturație, vitezele de compresie sunt variabile, funcție de adâncime și de natura amestecului respirator. Scufundările în saturație cu viteze mari, la adâncimi de peste 150...200 m, au pus în evidență "deteriorări" ale capacității fizice a scafandrilor, materializate prin oboseală intensă, amețeli, tremur etc. Aceste "deteriorări" au primit denumirea generică de Sindrom Nervos al Înaltelor Presiuni (SNIP). La început, SNIP a fost pus pe seama heliului din amestecul respirator sintetic, dar s-a dovedit că inducerea SNIP este

provocată de viteza compresiei. Acesta a fost motivul pentru care, la Laboratorul Hiperbar din cadrul Centrului de Scafandri Constanța, s-a abordat studiul SNIP indus de vitezele de compresie mari în scufundări cu amestecuri respiratorii sintetice HELIOX, pentru a se pune la punct un barem de aptitudine pentru scafandrii care efectuează intervenții sub apă la mare adâncime.

În cadrul studiului s-au efectuat investigații electroencefalografice (EEG) și de tremur postural. Tremurul postural a fost înregistrat cu ajutorul unui traductor seismic amplasat pe degetul median al mâinii drepte, pe un electroencefalograf adaptat special pentru aceste înregistrări. Au fost investigați 27 scafandri de mare adâncime în scufundări cu amestecuri respiratorii HELIOX, în care heliul reprezintă 95% ($r_{\mathrm{He}} = 0,95$) și oxigenul 5% ($r_{\mathrm{O_2}} = 0,05$), la adâncimea de 180 m [$p_{\mathrm{He}} =$ 18050 mbar (sc. abs.) și $p_{\mathrm{O_2}} =$ 950 mbar (sc. abs.)]. Viteza compresiei a fost de 10 m/min. Au fost făcute înregistrări la suprafață (presiunea atmosferică) și imediat după ce s-a atins presiunea corespunzătoare adâncimii de 180 m [19 bar (sc. abs.)].

Datorită variațiilor individuale mari înregistrate la presiunea atmosferică, scafandrii au fost împărțiți în trei grupe funcție de amplitudinea tremurului înregistrat: o grupă cu tremur a cărui amplitudine a fost cuprinsă între 1 mm și 3 mm, considerată *grupa cu tremur scăzut*, o *grupă cu tremur mediu* a cărui amplitudine a fost cuprinsă între 3 mm și 5 mm și o *grupă cu tremur mare* a cărui amplitudine a fost cuprinsă între 5 mm și 7 mm. Amplitudinea tremurului postural a fost calculată, după înregistrările efectuate, din punct de vedere cantitativ, în milimetri și, din punct de vedere calitativ, în procente funcție de valoarea obținută la presiunea atmosferică.

S-a observat că, în general, tremurul apare la scufundări ce depășesc 150 m adâncime și este caracterizat de un tremur vizibil la extremități (deget, mână), care se intensifică o dată cu creșterea adâncimii, așa cum s-a demonstrat ulterior în experimentele efectuate la presiuni de 41 bar (sc. abs.) și 51 bar (sc. abs.) în cadrul Laboratorului Hiperbar din cadrul Centrului de Scafandri Constanța al Forțelor Navale Române.

Frecvența tremurului la presiunea atmosferică a fost de aproximativ 8...12 cicli/s. În procesele hiperbare nu au apărut modificări ale frecvenței tremurului. Amplitudinea tremurului crește o dată cu creșterea presiunii, în mod semnificativ la scafandrii cu tremur inițial scăzut și mediu și nesemnificativ la scafandrii cu tremur inițial mare. Tremurul observat în scufundări la mare adâncime cu amestecuri respiratorii HELIOX a fost denumit "helium tremor", dar a fost observat și în scufundări cu amestecuri respiratorii HIDROX. Etiopatologia fenomenului nu este cunoscută. Tremurul se consideră ca un simptom senzitiv legat de stresul proceselor hiperbare, stres care poate altera conducția nervoasă și chiar metabolismul.

Analogiile cu tremurul fiziologic *minor tremor*, făcute de unii autori au luat în considerare tremurul datorat proceselor hiperbare ca o exagerare a tremurului fiziologic, implicând atât mecanismele centrale cât și cele periferice.

Pe timpul compresiilor s-au efectuat înregistrări EEG și de *potențiale evocate**). Principalele manifestări ale SNIP au constat în reducerea frecvenței undelor, inhibarea potențialelor evocate și somnolență. Au mai fost puse în evidență și tulburări psihomotorii explicabile parțial prin intensificarea tremurului, dereglări ale performanței senzoriomotorii și ale funcțiilor mintale, cu afectarea memoriei de lungă durată. Totuși, la om, simptomele sunt reversibile. Adâncimea la care apar simptomele variază invers proporțional cu viteza compresiei fiind dependentă și de susceptibilitatea individuală programată genetic. Un element caracteristic este fenomenul de adaptare, tradus prin reducerea sau dispariția semnelor după o perioadă de expunere la presiune. Spre exemplificare, se redă în figura 3.1 variația performanței dexterității manuale pe timpul unei scufundări în saturație simulate la adâncimea de 450 m, scufundare executată în cadrul Laboratorului Hiperbar din cadrul Centrului de Scafandri Constanța (figura 3.2), în seria scufundărilor PONTUS, după un procedeu original.

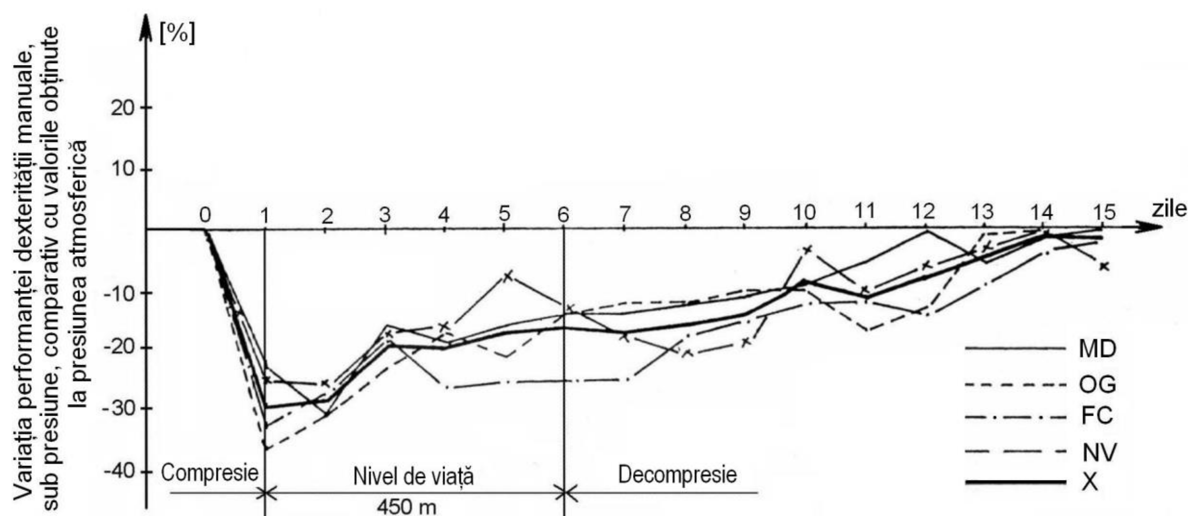


Figura 3.1 Variația performanței dexterității manuale pe timpul scufundării în saturație la 450 m adâncime, în cadrul experimentului PONTUS IV

După Fructus, simptomele SNIP se împart în două categorii:

- simptome clinice: tremur, dismetrie, fasciculații și convulsii musculare, somnolență;
- simptome EEG: modificări EEG, creșterea activității frecvențelor teta, scăderea activităților frecvențelor alfa și beta, tulburări ale somnului.

Etiopatologia SNIP se explică printr-o serie de factori sistematizați de Hunter și Bennett în factori indirecți, în care se citează oxigenul și dioxidul de carbon (ambii cu rol minor) și temperatura, în special hipertermia, ca element favorizant și în factori direcți, în care se citează, în primul rând, fenomenele de osmoză. Conform ipotezei gradienților osmotici a lui Kylstra, prin compresie rapidă se creează gradienți de saturare a gazelor inerte între țesuturile hidrofile, rapide, cum este sângele, și țesuturile lente hidrofobe. Acești gradienți osmotici

*) Potențialul evocat: potențial EEG pus în evidență prin înregistrări cu stimuli luminoși.

determină deplasări de lichide între diferite compartimente cu tulburări morfofuncționale multiple. Obiecția principală rezidă din faptul că gradienții osmotici se mențin scurt timp (10...20 minute), pe când simptomatologia SNIP persistă timp îndelungat. Gazele inerte pot, de asemenea, acționa direct prin proprietățile lor moleculare.

În cazul scufundărilor în saturație, expunerea organismului uman la presiunea ambiantă nu depinde decât de valoarea acesteia, ținând cont de faptul că timpul de expunere la presiune este suficient de mare pentru ca toate țesuturile organismului să se satureze cu gazul inert din amestecul respirator.

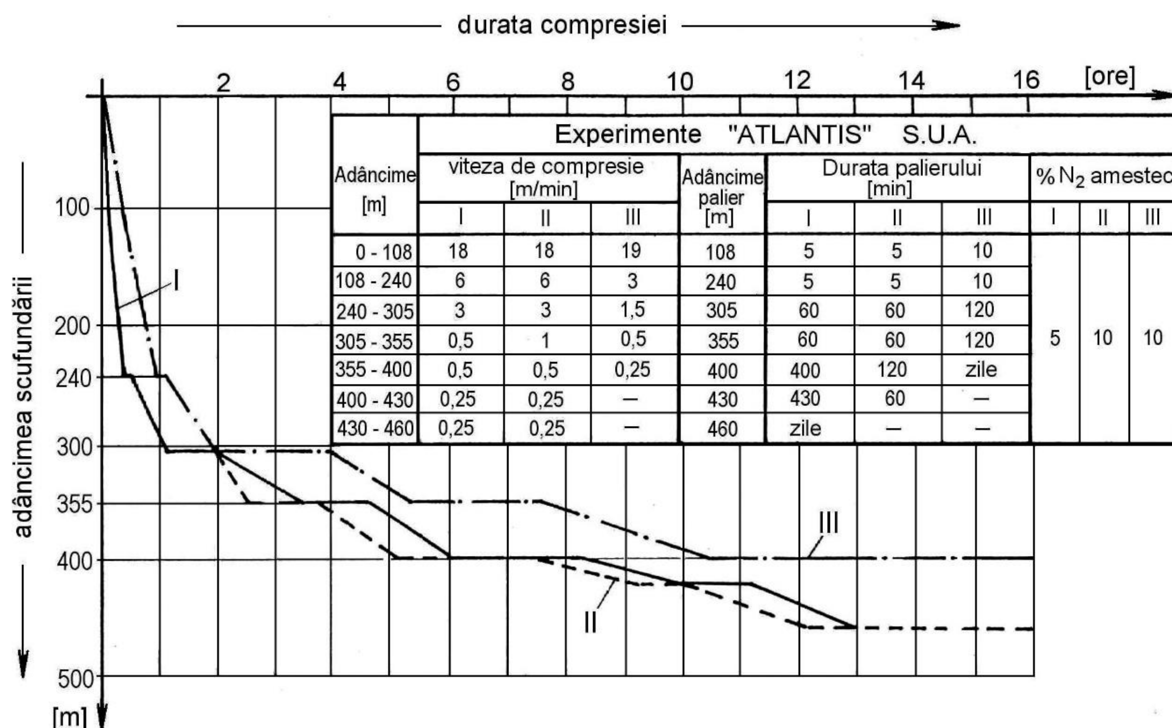
Studii asupra valorii vitezei de compresie în scufundări în saturație la adâncimi mari, cu amestecuri respiratorii sintetice binare (HELIOX) sau ternare (TRIMIX) au fost efectuate de către cercetători americani și francezi în experimentele ATLANTIS (figura 3.3) și respectiv CORAZ (figura 3.4).



Figura 3.2 Interiorul unei barocamere aparținând sistemului de scufundare din cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța

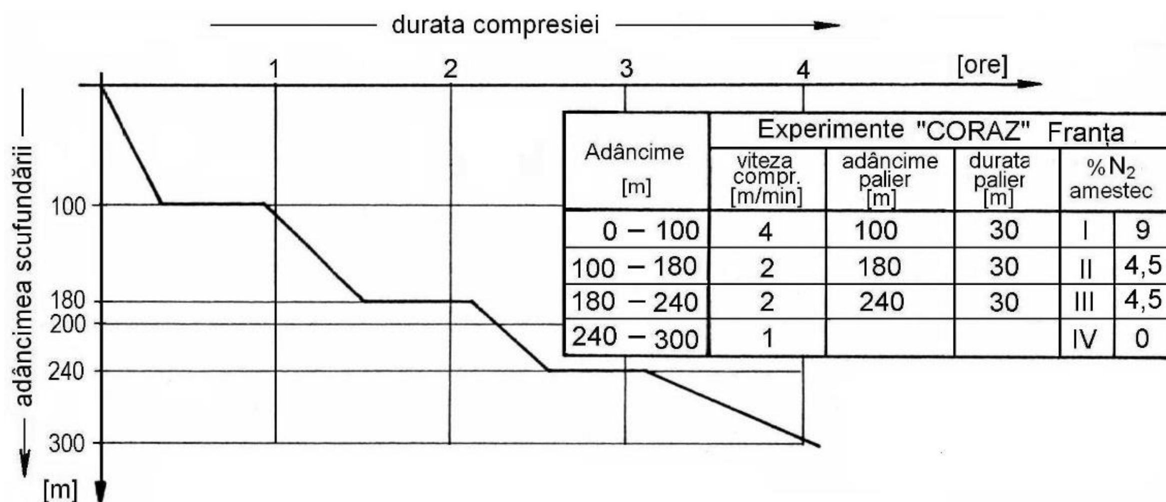
Experimentările au fost efectuate cu amestecuri respiratorii ternare, heliu-azot-oxigen (TRIMIX), în care concentrația azotului a variat între 5% și 10% ($r_{N_2} = 0,05...0,10$) în cazul experimentelor ATLANTIS și între 0% și 9% ($r_{N_2} = 0,00...0,09$) în cazul experimentelor CORAZ, pentru a se stabili corelația între aceasta și viteza compresiei în vederea ameliorării SNIP. În seria ATLANTIS unde, până la 300 m adâncime, vitezele compresiei au fost de două ori mai mari decât în experimentele CORAZ și PONTUS s-au generat la scafandri stări de vomă, oboseală, tremur și alte semne ale SNIP care au fost evidențiate la sosirea la adâncimea (presiunea) de lucru, dar ameliorate către ziua a doua. Acesta pare a fi motivul pentru care cercetătorii americani au concluzionat că adaosul de 5% azot ($r_{N_2} = 0,05$) în amestecul respirator HELIOX, rezultând astfel un amestec TRIMIX, nu satisface pentru prevenirea SNIP. Cert este că s-a demonstrat, în toate celelalte experimente, că introducerea azotului în amestecul respirator diminuează "deteriorarea"

performanțelor psihomotorii datorate vitezei de compresie și facilitează acomodarea după o perioadă relativ scurtă la adâncimea de lucru, ceea ce nu realizează un amestec binar HELIOX.



Adâncime [m]	viteza de compresie [m/min] I	II	III	Adâncime palier [m]	Durata palierului [min] I	II	III	% N_2 amestec I	II	III
0 - 108	18	18	19	108	5	5	10			
108 - 240	6	6	3	240	5	5	10			
240 - 305	3	3	1,5	305	60	60	120			
305 - 355	0,5	1	0,5	355	60	60	120	5	10	10
355 - 400	0,5	0,5	0,25	400	400	120	zile			
400 - 430	0,25	0,25	—	430	430	60	—			
430 - 460	0,25	0,25	—	460	zile	—	—			

Figura 3.3 Profilul compresiilor în seria scufundărilor ATLANTIS



Adâncime [m]	viteza compr. [m/min]	adâncime palier [m]	durata palier [m]	% N_2 amestec	
0 – 100	4	100	30	I	9
100 – 180	2	180	30	II	4,5
180 – 240	2	240	30	III	4,5
240 – 300	1			IV	0

Figura 3.4 Profilul compresiei în seria scufundărilor CORAZ

În tabelul 3.1 sunt prezentate variațiile medii ale vitezelor de compresie, funcție de adâncime, în experimentele ATLANTIS, CORAZ și PONTUS. Se remarcă faptul că asupra valorilor vitezei de compresie părerile sunt destul de

diferite cu cât adâncimile sunt mai mici. La adâncimi mari, peste 240 m, coeficientul de variație a mediei vitezelor de compresie scade sub 50%.

În cazul scufundărilor în saturație la adâncimi de peste 180 m, sau chiar și în cazul scufundărilor unitare profunde, se poate preciza faptul că, datorită gamei largi a vitezelor de compresie utilizate precum și a unei game reduse de amestecuri respiratorii testate, nu s-a ajuns încă la o tehnologie de compresie cât mai apropiată de ideal, pentru a avea la adâncimea de lucru scafandri apți pentru intervenții imediate.

Studiind profilele experimentărilor efectuate, se remarcă faptul că, pe timpul compresiei, la anumite adâncimi, au fost efectuate paliere cu durate diferite, care au permis atât odihna scafandrilor cât și efectuarea unor serii de teste pentru aprecierea performanțelor psihomotorii.

Tabelul 3.1 Variația vitezelor medii de compresie funcție de adâncime, în experimentele ATLANTIS, CORAZ și PONTUS

Intervalul de adâncimi [m]	Viteza medie a compresiei [m/min]	Coeficientul de variație a mediei [%]
0...100	9,4 ± 8,1	86
100...180	3,9 ± 2,6	67
180...240	3,5 ± 2,2	63
240...300	2,1 ± 0,9	43
300...400	0,6 ± 0,25	42
400...500	0,25	0

Cert este faptul că aceste paliere contribuie la ameliorarea SNIP și trebuie luate în considerare când se fac recomandări privind modul în care să se realizeze o compresie rapidă spre adâncimi mari. Din numeroasele determinări realizate în scufundările profunde efectuate în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța, a rezultat că nu trebuie neglijată performanța umană, motiv pentru care s-a pus la punct un test pentru scufundări profunde ce constă în executarea unei scufundări la 180 m adâncime cu viteza de compresie 10...18 m/min și efectuarea unei serii de teste ce constau din investigații EEG și de tremur postural. În urma cercetărilor efectuate s-a stabilit că, pentru scufundări profunde, pot fi acceptați scafandri la care variația amplitudinii tremurului postural nu depășește +80% față de tremurul prelevat la presiunea atmosferică și ale căror unde EEG lente (1...4 Hz) nu depășesc 35%.

Pentru scufundări în saturație la adâncimi mici, vitezele de compresie pot fi alese funcție de natura intervenției și a amestecului respirator, astfel încât scafandrul să poată interveni sub apă în condiții optime. Din practica LH, pentru scufundări în saturație cu amestecuri NITROX până la 50...70 m adâncime nu este necesară o viteză de compresie mai mare de 1 m/min.

Calculul gradului de expunere a organismului uman la presiunea ambiantă presupune determinarea presiunii gazului sau a gazelor inerte dizolvate în țesuturile acestuia. Pentru aceasta, organismul uman a fost împărțit în compartimente de țesuturi cărora li s-a atribuit o perioadă de semisaturație.

Compartimentele de țesuturi reprezentative au fost stabilite pe cale experimentală.

3.2.2 Calculul gradului de saturare a țesuturilor organismului uman pe timpul expunerilor în cadrul proceselor hiperbare

Calculul gradului de saturare a țesuturilor organismului uman pe timpul expunerii în cadrul proceselor hiperbare se efectuează numai pentru determinarea procedeelor de decompresie după scufundări unitare. În calculul procedeelor de decompresie după scufundări în saturație se pornește de la faptul că toate țesuturile organismului sunt saturate în gaz inert, iar pentru determinarea procedeelor de decompresie este suficient să se ia în calcul compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație cea mai mare.

Pentru calculul presiunii gazului inert dizolvat în țesuturi pe timpul expunerii în cadrul proceselor hiperbare se folosesc, în ordine, următoarele mărimi:

Pentru tabelele de decompresie după scufundări cu aer calculate în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța, compartimentele de țesuturi alese au fost cele cărora le-au corespuns următoarele perioade de semisaturație *H*: 10, 20, 40, 60, 80 și 120 minute.

În prima etapă de calcul trebuie să se determine presiunea totală a gazului inert dizolvat în țesuturi la adâncimea maximă h_{abs} după timpul de expunere *t*. Pentru buna organizare a calculului, acesta se ordonează în fișe speciale. Se prezintă, pentru exemplificare, calculul gradului de saturare a compartimentelor de țesuturi, conform modelului matematic prezentat, în cazul unei scufundări la adâncimea de $h = 30$ m, cu timp de expunere la presiune $t = 60$ minute, în care, ca amestec respirator s-a folosit aer comprimat $(r_{gi} = r_{N_2} = 0,8)$.

3.3 REVENIREA LA PRESIUNEA ATMOSFERICĂ. DECOMPRESIA

Revenirea la presiunea atmosferică (decompresia) este acea parte a scufundării prin care scafandrul este readus la suprafața apei (la presiunea atmosferică). Viteza decompresiei este dată de viteza de eliminare a gazului inert dizolvat în țesuturile organismului pe timpul expunerii acestuia proceselor hiperbare.

3.3.1 Modele matematice pentru calculul procedeelor de decompresie

Pe timpul expunerii organismului uman la presiune (etapele scufundării reprezentând compresia și lucrul în imersiune) gazul inert se dizolvă în țesuturi. Acest fenomen este funcție de presiune, temperatură, durata expunerii la presiune și natura gazului inert din amestecul respirator. Timpul în care presiunea gazului dizolvat într-un lichid, la temperatură constantă, atinge o valoare situată la jumătatea intervalului cuprins între presiunea gazului dizolvat

la momentul inițial p_0 și presiunea gazului la care este expus p_i, reprezintă *perioada de semisaturație a lichidului* respectiv *H*. Deci, *H* este timpul de expunere corespunzător atingerii de către gazul dizolvat a unei presiuni egale cu $p_0 + (p_i - p_0)/2 = (p_i + p_0)/2$ așa după cum se arată în figura 3.5.

În cazul țesuturilor umane, pentru calculul expunerii organismului la presiune precum și a procedeelor de decompresie, s-au stabilit compartimente de țesuturi cărora li s-au atribuit, în mod arbitrar, perioade de semisaturație, realizându-se astfel un model matematic de calcul.

Procesele de saturație și desaturație ce au loc pe timpul activităților de pătrundere a omului sub apă trebuie privite în mod unitar. Pentru exemplificare, în figura 5.9 este prezentat profilul unei scufundări unitare la adâncimea corespunzătoare presiunii $p_h = 6\,\mathrm{bar}$ (sc. abs.), cu un timp de expunere la presiune de 21 minute și procesele de saturare–desaturare ce au loc în compartimentele de țesuturi cu perioadele de semisaturație *H* = 5, 10, 20 și 40 minute.

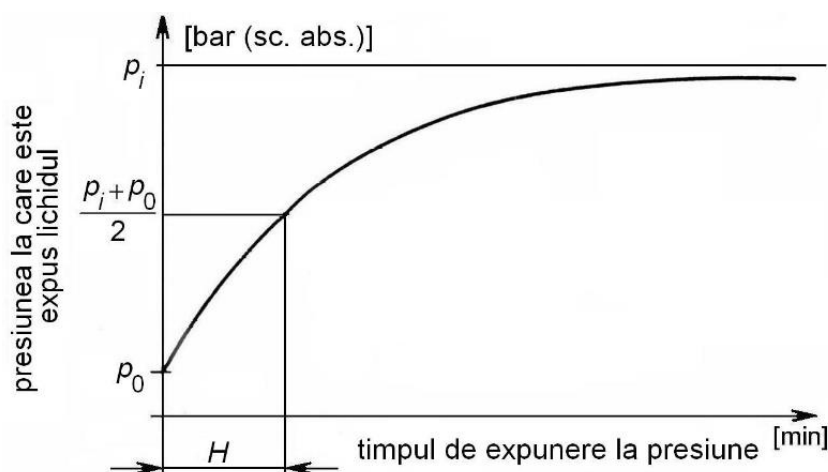


Figura 3.5 Perioada de semisaturație *H* a unui lichid expus la presiunea p_i, la temperatură constantă

Dizolvarea gazului inert în cadrul proceselor hiperbare specifice pătrunderii omului sub apă este mai mult sau mai puțin completă, funcție de durata expunerii. Astfel, pentru scufundări unitare, numai o parte dintre țesuturi, definite ca țesuturi rapide, se saturează cu gaz inert pe când celelalte, definite ca țesuturi lente, ating o presiune de gaz dizolvat mai mică decât presiunea parțială a gazului inert la care a fost expus organismul (figura 3.6).

Pentru scufundări în saturație, scufundări cu expuneri de lungă durată, se poate considera că toate țesuturile organismului se saturează cu gazul inert din compunerea amestecului respirator, iar pentru calculul decompresiei se ia în considerare numai compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație *H* cea mai mare sau un anumit compartiment de țesuturi numit *compartiment de țesuturi director.*

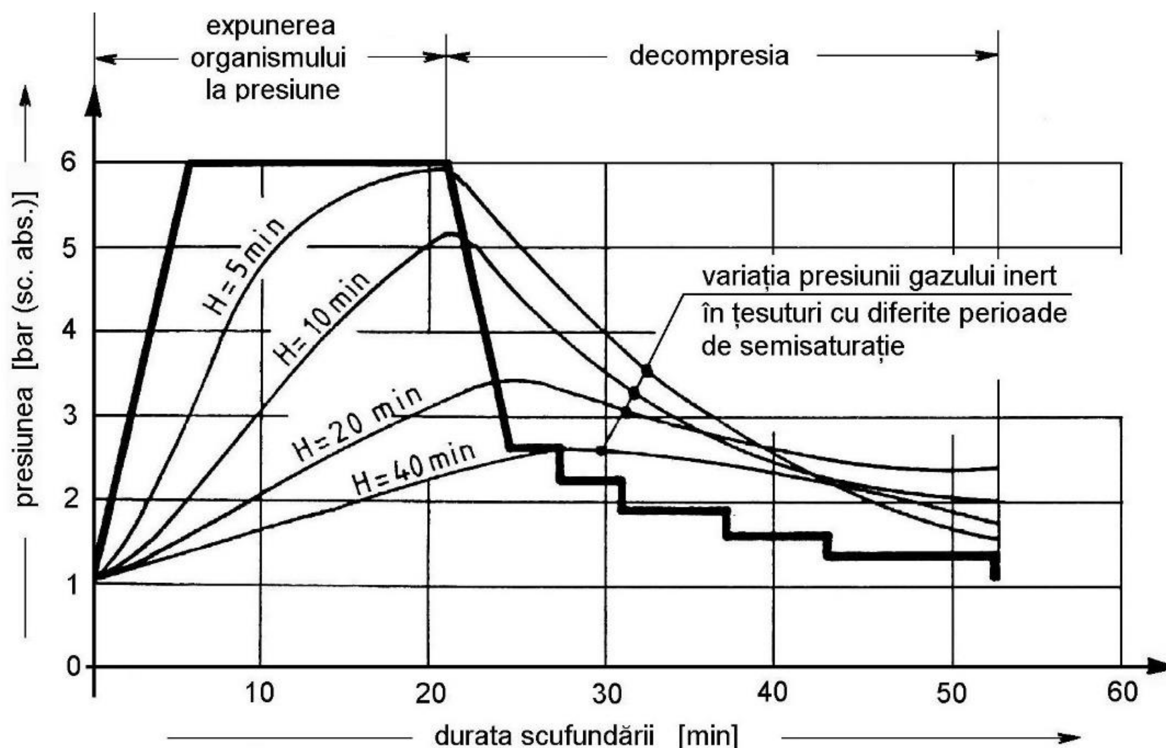


Figura 3.6 Procesele de saturație și desaturație pe timpul unei scufundări unitare executată la adâncimea corespunzătoare presiunii de 6 bar (sc. abs.) și cu un timp de expunere la presiune de 21 minute (compresia și lucrul în imersiune)

În continuare, se prezintă câteva modele matematice folosite pentru calculul procedeelor de decompresie. Procedeul de decompresie, ce se materializează printr-o tabelă de decompresie, trebuie să cuprindă informații privind: adâncimea scufundării, durata scufundării sau timpul de expunere a scafandrului la presiune, palierele de decompresie și duratele acestora.

3.3.1.1 Modelul „suprasaturație multi-țesut”

Modelul matematic *suprasaturație multi-țesut* a fost propus pentru prima dată de Haldane. Suprasaturația se referă la starea țesuturilor organismului la decompresie (după scăderea relativ rapidă a presiunii ambiante) când presiunea gazului inert dizolvat devine mai mare decât presiunea parțială a aceluiași gaz din amestecul respirator. Noțiunea de multi-țesut se referă la complexitatea organismului uman.

Pentru calculul presiunii gazului inert dizolvat într-un fluid, se pleacă de la ipoteza lui Haldane: viteza de variație a presiunii gazului dizolvat într-un lichid este proporțională cu diferența dintre valoarea presiunii parțiale a gazului inert din amestecul respirator și presiunea gazului dizolvat:

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t} = \lambda\,(p_i - p) \quad \text{sau} \quad \frac{\mathrm{d}p}{p_i - p} = \lambda\,\mathrm{d}t \qquad (3.1)$$

unde: p_i este presiunea parțială a gazului inert din amestecul respirator; *p* - presiunea gazului inert dizolvat în țesuturi; λ - o constantă caracteristică suprafeței de separare și formei ocupate de lichid sau țesut.

Se notează:

$$p_i - p = u; \quad \mathrm{d}p = -\mathrm{d}u; \quad -\frac{\mathrm{d}u}{u} = \lambda\ \mathrm{d}t \qquad (3.2)$$

Integrând se obține succesiv:

$$\int \frac{\mathrm{d}u}{u} = -\lambda \int \mathrm{d}t + C,$$

$$\ln u = -\lambda\, t + \ln k,$$

unde

$$C = \ln k,$$

$$\ln \frac{u}{k} = -\lambda t,$$

sau

$$\exp\left(\ln \frac{u}{k}\right) = \exp\left(-\lambda\, t\right),$$

de unde:

$$\frac{u}{k} = \exp\left(-\lambda\, t\right)$$

și deci:

$$u = k \exp\left(-\lambda\, t\right) \qquad (3.3)$$

Înlocuind în relația (3.2) expresia lui *u* se obține:

$$p_i - p = k \exp\left(-\lambda\, t\right)$$

sau

$$p = p_i - k \exp(-\lambda t) \tag{3.4}$$

cu

$$k = p_i - p_0, \tag{3.5}$$

unde p_0 este presiunea gazului inert dizolvat într-un lichid la timpul *t = 0*.

Se obține astfel:

$$p = p_i - (p_i - p_0)\exp(-\lambda t),$$

care se mai poate scrie:

$$p = p_i - p_i \exp(-\lambda t) + p_0 \exp(-\lambda t) + p_0 - p_0, \tag{3.6}$$

de unde:

$$p = p_0 + (p_i - p_0)[1 - \exp(-\lambda t)], \tag{3.7}$$

care reprezintă presiunea gazului inert dizolvat la momentul t, în lichidele și țesuturile organismului.

Așa cum s-a arătat mai sus, pentru țesuturile umane, se atribuie acestora, în mod arbitrar, o perioadă de semisaturație. După Workman, pentru calculul procedeelor de decompresie se pot lua în considerare compartimente de țesuturi cărora le corespund perioadele de semisaturație *H* de 5, 10, 20, 40, 80 și 120 minute. Aceste compartimente se iau în calcul când este vorba de scufundări unitare autonome la adâncimi de până la 60 m. Pentru adâncimi mai mari sau pentru timpi de expunere la presiune mai lungi, trebuie luate în calcul și compartimente de țesuturi cu perioade de semisaturație *H* de 160, 200 și chiar 240 minute. Acest ultim tip de eșantion este suficient pentru calculul procedeelor de decompresie după scufundări unitare de sistem până la adâncimea de 180 m.

După Jones, perioadele de semisaturație H ale compartimentelor de țesuturi sunt cuprinse între 1,5 minute și 300 minute. Jones recomandă pentru calculul procedeelor de decompresie compartimentele de țesuturi cărora le-a atribuit perioadele de semisaturație H de 1,5; 7,9; 29; 120 și 300 minute, care corespund unor curbe exponențiale determinate experimental. Cel mai rapid compartiment de țesuturi, cu perioada de semisaturație $H =$ 1,5 minute, nu intervine în calcul și, o decompresie cu viteza de 15...17 m/min, elimină influența sa. Compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație $H =$ 300 minute nu este afectat în cazul scufundărilor unitare autonome, dar din calculul

procedeelor de decompresie nu pot fi înlăturate compartimentele intermediare cu perioade de semisaturație H de 60 minute și chiar 80 minute.

Modelul matematic folosit în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța pentru calculul procedeelor de decompresie după scufundări unitare autonome a cuprins compartimentele de țesuturi cu perioade de semisaturație H de 10, 20, 40, 60, 80 și 120 minute. În tabelul 3.2 și în figura 3.7 sunt prezentați timpii de expunere la presiune necesari pentru saturarea cu gaz inert a diferitelor compartimente de țesuturi caracterizate de perioada lor de semisaturație H.

Din datele prezentate în tabelul 3.2 se observă că după o oră, compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație $H=$10 minute este saturat cu gaz inert în proporție de 98,43%, cel cu perioada de semisaturație $H=$20 minute în proporție de 87,5%, iar cel cu perioada de semisaturație $H=$ 60 minute în proporție de 50%. Această constatare este foarte importantă pentru calculul procedeelor de decompresie, putându-se determina în orice moment raportul saturării diferitelor compartimente de țesuturi față de presiunea de referință.

Se poate considera că un compartiment de țesuturi este saturat cu gazul inert din amestecul respirator inhalat sub presiune atunci când raportul dintre durata de expunere și perioada de semisaturație este $t/H=6$. Spre exemplu, un compartiment de țesuturi cu perioada de semisaturație $H=$ 300 minute se saturează după 300 × 6 = 1800 minute, adică după 30 ore de expunere la presiune.

Tabelul 3.2 Timpii de saturare a compartimentelor de țesuturi caracterizate de o perioadă de semisaturație *H*, folosiți în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța pentru calculul procedeelor de decompresie

Perioada de semisaturație a compartimentului *H* [min]	**Procente de saturație [%]**								
	50	**75**	**87,5**	**93,75**	**96,875**	**98,43**	**99,22**	**99,61**	**99,81**
	(ore. minute)								
10	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	1,00	1,10	1,20	1,30
20	0,20	0,40	1,00	1,20	1,40	2,00	2,20	2,40	3,00
40	0,40	1,20	2,00	2,40	3,20	4,00	4,40	5,20	6,00
60	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00
80	1,20	2,40	4,00	5,20	6,40	8,00	9,20	10,40	12,00
120	2,00	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00
160	2,40	5,20	8,00	10,40	13,20	16,00	18,40	21,20	24,00
200	3,20	6,40	10,00	13,20	16,40	20,00	23,20	26,40	30,00
240	4,00	8,00	12,00	16,00	20,00	24,00	28,00	32,00	36,00

Revenind la relația (3.7) se va nota:

$$F=1-\exp(-\lambda t), \quad (3.8)$$

ceea ce reprezintă, la momentul t, fracțiunea de gaz inert din diferența de presiune dintre presiunea parțială a gazului inert din amestecul respirator și presiunea aceluiași gaz dizolvat în țesuturi.

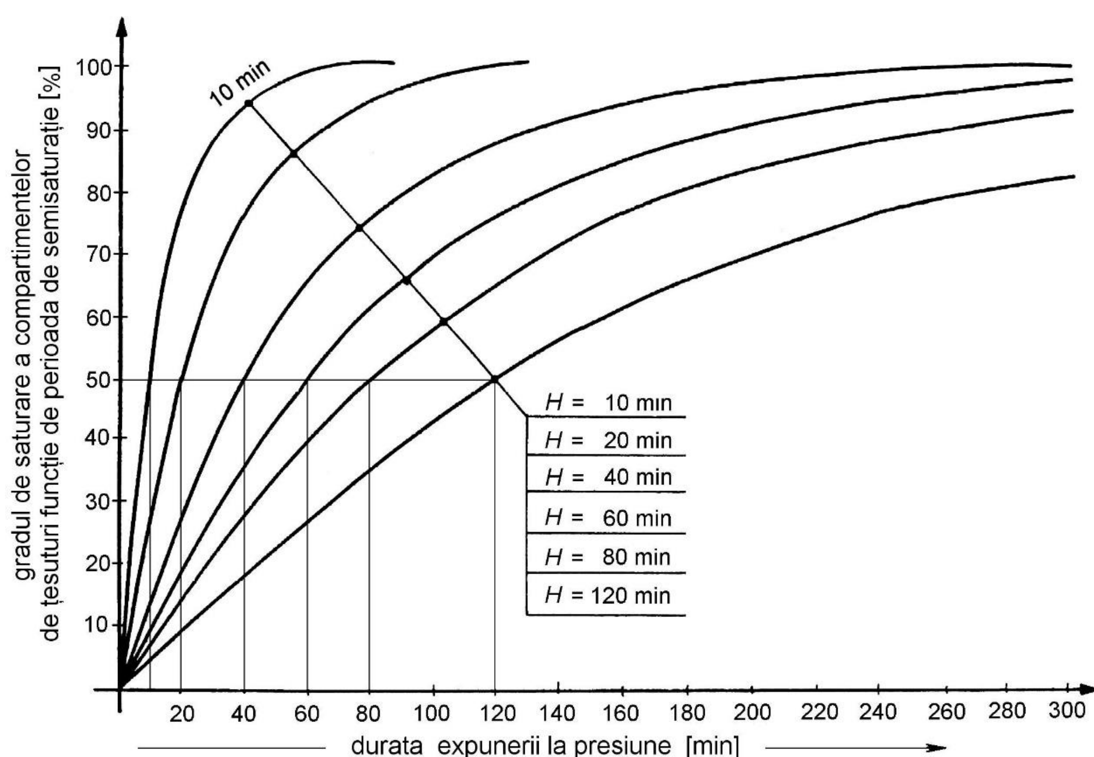


Figura 3.7 Curbele exponențiale de saturație corespunzătoare compartimentelor de țesuturi folosite în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța la calculul procedeelor de decompresie după scufundări unitare autonome

Dacă se ia în considerare, prin definiție (figura 5.8) că la atingerea timpului corespunzător perioadei de semisaturație fracțiunea de gaz inert dizolvat în țesuturi este la jumătate, se poate scrie:

$$F = 1 - \exp(-\lambda H) = \frac{1}{2}, \qquad (3.9)$$

unde H este perioada de semisaturație a compartimentului de țesuturi [min].

Din relația (3.9) rezultă expresia:

$$\exp(-\lambda H) = \frac{1}{2}$$

căreia aplicându-i logaritmii se obține:

$$\ln\left[\exp(-\lambda H)\right] = \ln\frac{1}{2}$$

sau

$$\lambda H = 0,693$$

de unde rezultă expresia lui λ funcție de H:

$$\lambda = \frac{0,693}{H}. \tag{3.10}$$

Înlocuind expresia lui λ în relația (3.9) se obține:

$$F = 1 - \exp\left(-0,693\frac{t}{H}\right),$$

dar ținând cont că

$$\exp(-0,693) = 0,5$$

și dacă se notează

$$\frac{t}{H} = u,$$

se obține în final:

$$F = 1 - 0,5^{u}. \tag{3.11}$$

3.3.1.2 Modelul echilibrului de faze

Aproximarea termodinamică a lui Hills este mai complexă decât modelul "suprasaturație multi-țesut" propus de Haldane. Modelul termodinamic este bazat pe echilibrul de fază dintre gazele dizolvate și gazele separate, perfuzia – difuzia radială a gazelor din capilare prin membranele celulelor, funcțiile exponențiale de răspuns Bessel și punctele limită pentru separarea volumelor de gaz.

Dizolvarea temporară și eliminarea gazului inert din masa țesutului este limitată de perfuzie și difuzie. Modelul de transport invocat este al unei zone vasculare complet saturată din care sângele venos o părăsește în echilibru cu toate gazele, în timp ce sângele arterial nici nu diminuează nici nu înlocuiește gazele dizolvate în zonă. Din zona vasculară dezvoltată, gazele difuzează în zona celulară. Pentru simplificare, zona dezvoltată se presupune simetrică, cilindrică și unidimensională, așa cum este prezentată în figura 3.8. Ecuația radială a difuziei gazului inert în materialul celular se poate scrie sub forma:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\,\frac{\partial p}{\partial r}=\frac{1}{D}\,\frac{\partial p}{\partial t}\,. \qquad (3.12)$$

Separând variabilele pentru constanta ε^2 de separare, aplicând condițiile inițiale:

pentru $t=0, \quad p=p_0$

și condițiile la limită:

la $r=a, \quad p=p_i$

la $r=b, \quad \dfrac{p}{r}=0$

și rezolvând ecuația, în cazul unei difuzii pure, se obține:

$$p-p_i=\left(p_0-p_i\right)E\left(r,\,t\right), \qquad (3.13)$$

unde

$$E\left(r,t\right)=\bar{n}\,\underset{n=1}{\overset{\infty}{E}}\frac{J_1^2\left(b\,\varepsilon_n\right)\left[J_0\left(r\,\varepsilon_n\right)-N_0\left(r\,\varepsilon_n\right)\,J_0\left(a\,\varepsilon_n\right)\right]\exp\left(-\varepsilon_n^2\,Dt\right)}{\left[J_0^2\left(a\,\varepsilon_n\right)-J_1^2\left(b\,\varepsilon_n\right)\right]}\,. \qquad (3.14)$$

Valorile lui ε_n sunt rădăcinile (reale și simple) ale expresiei:

$$J_0\left(a\,\varepsilon_n\right)\,N_1\left(b\,\varepsilon_n\right)=N_0\left(a\,\varepsilon_n\right)\,J_1\left(b\,\varepsilon_n\right) \qquad (3.15)$$

unde *J* și *N* sunt funcțiile lui Bessel și respectiv Neumann.

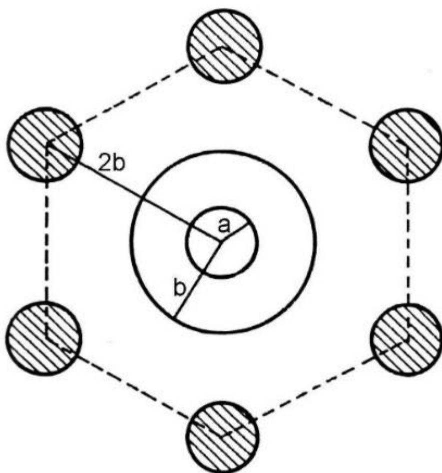


Figura 3.8 Modelul capilarului simetric și cilindric pentru difuzia radială

Forma ecuației (3.13) este analogă cu ecuația (3.7) din modelul lui Haldane. Funcția de răspuns a țesutului *E*, are aceeași semnificație ca și la modelul "suprasaturație multi-țesut".

3.3.2 Teorii de decompresie

În figura 3.9 este reprezentată variația presiunii parțiale a gazului inert funcție de timp, într-un compartiment de țesuturi cu perioada de semisaturație *H*, pe timpul decompresiei, la palierul de *t* minute, într-o ambianță cu presiunea parțială a gazului inert p_{hgi}. De menționat faptul că acest palier de decompresie începe de la o valoare a presiunii parțiale a gazului inert egală cu p_{gi} corespunzătoare primului palier sau palierului imediat superior, presiunea fiind scăzută până la nivelul p_{hgi} (prin scăderea presiunii amestecului) corespunzătoare palierului în curs de desfășurare.

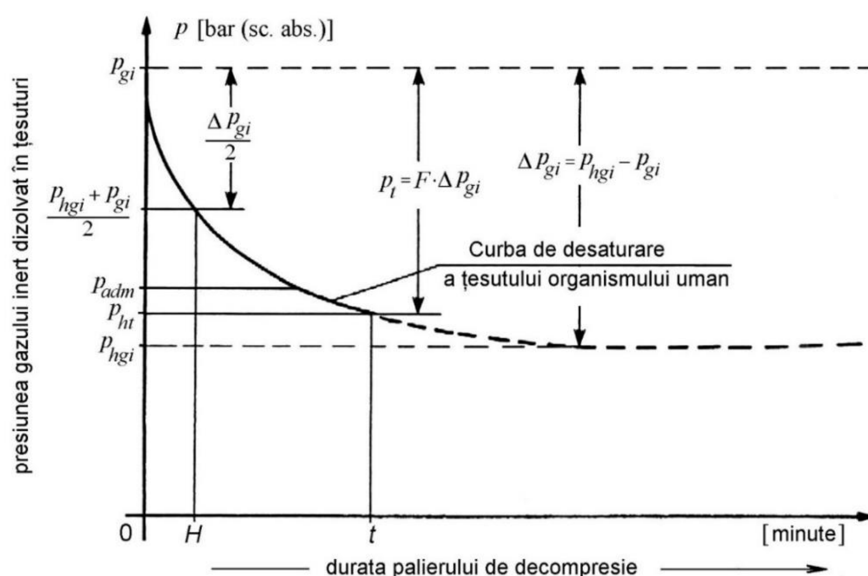


Figura 3.9 Variația presiunii gazului inert dizolvat într-un compartiment de țesuturi cu perioada de semisaturație *H*, pe timpul decompresiei, la un palier de *t* minute

Desaturarea țesutului de gaz inert dizolvat este o funcție exponențială, care se inițiază în momentul începerii scăderii presiunii, practic a ridicării spre primul sau următorul palier de decompresie și este "întreruptă" la terminarea timpului necesar de staționare la acest palier. Întreruperea curbei de desaturare, care este asimptotică la nivelul presiunii parțiale a gazului inert din amestecul respirator ambiant p_{hgi}, se face la o valoare p_{ht} mai mică sau cel mult egală cu *presiunea maximă admisibilă a gazului inert dizolvat în compartimentul de țesuturi* p_{adm}, presiune care a fost determinată în mod empiric și verificată

experimental. Această presiune maximă admisibilă se va analiza pentru fiecare procedeu de decompresie în parte.

Imediat ce începe decompresia (scăderea presiunii), apare o diferență de presiune negativă între presiunea parțială a gazului inert din amestecul respirator ambiant, corespunzător palierului, p_{hgi} și presiunea aceluiași gaz dizolvat în țesuturi $p_{gi} (\Delta p_{gi} = p_{hgi} - p_{gi} < 0)$. Această diferență de presiune determină degazarea țesuturilor de gazul inert dizolvat după curba arătată în figura 3.9. Pe tot timpul decompresiei, o parte dintre țesuturile organismului (în cazul scufundărilor unitare) sau toate țesuturile (în cazul scufundărilor în saturație) sunt suprasaturate cu gaz inert, ceea ce înseamnă că presiunea gazului inert dizolvat în țesuturi, este mai mare decât presiunea parțială a aceluiași gaz din amestecul respirator ambiant. Nivelul acestei suprasaturații nu trebuie să depășească o anumită valoare critică, deoarece se poate produce o degazare bruscă, cu formare de bule de gaz, circulante sau staționare, care pot genera accidente de scufundare mai mult sau mai puțin grave. Astfel, a fost definită noțiunea de presiune maximă admisibilă a gazului inert dizolvat în țesuturi p_{adm}.

În legătură cu acest concept, pe plan mondial sunt două tendințe. Unele școli de studii hiperbare folosesc noțiunea de presiune maximă admisibilă prin traducerea acesteia în *diferența de presiune admisibilă* dintre presiunea gazului inert dizolvat și presiunea parțială a gazului inert din amestecul respirator. Promotorul acestei idei a fost Workman, în timp ce Haldane a folosit noțiunea de presiune maximă admisibilă prin traducerea acesteia în *coeficientul de suprasaturație critic* sau *raportul de suprasaturație critic* notat cu C_{SC} și respectiv R_{SC}. Coeficientul (raportul) de suprasaturație critic reprezintă raportul dintre presiunea gazului inert dizolvat în țesuturile organismului uman și presiunea parțială a gazului inert din amestecul respirator, astfel încât să se permită degazarea țesutului fără formarea de bule de gaz, circulante sau staționare, periculoase.

Atât diferența de presiune admisibilă cât și coeficientul (raportul) de suprasaturație critic reprezintă rezultatul unui ansamblu de observații clinice, la început pe scafandri decomprimați după proceduri empirice, scafandri care au "plătit" prin accidente de decompresie revenirea la presiunea atmosferică. Apoi, prin analiza acestor accidente, s-a ajuns la elaborarea tabelelor de decompresie. Acest rezultat final s-a bazat și pe informațiile obținute în experimentele pe animale.

În continuare se prezintă câteva dintre teoriile de bază privind cele două concepte de presiune admisibilă și de coeficient (raport) de suprasaturație critic.

3.3.2.1 Teoria americană de decompresie

Primele studii asupra decompresiei au necesitat experimente pe animale și oameni, cu expuneri repetate în ambianțe hiperbare. În urma acestor studii a

apărut prima metodă de calcul a decompresiei, care exprimă în procente gradul de saturare sau de desaturare a țesuturilor organismului uman supus proceselor hiperbare cu amestec respirator aer, precum și presiunea maximă admisibilă a azotului în țesuturi, pe timpul decompresiei, astfel încât să nu se producă accidente de decompresie.

Limita aplicată pentru reducerea presiunii ambiante a fost stabilită plecând de la faptul că presiunea gazului inert dizolvat în țesuturi nu trebuie să fie mai mare decât de două ori presiunea parțială a aceluiași gaz din amestecul respirator. Acest raport, numit *raport de suprasaturație critic* R_{SC}, era considerat de Haldane ca fiind 2/1, deci pentru azot ar fi fost 2/1 $\times$ 0,79 = 1,58 [bar (sc. abs.)].

Se ignoră prezența oxigenului din amestecul respirator ca factor în formarea bulelor de gaz. Extinderea cercetărilor în domeniul pătrunderii omului sub apă, cu amestecuri respiratorii heliu-azot-oxigen (TRIMIX) sau cu amestecuri supraoxigenate, au confirmat absența efectului oxigenului pe timpul decompresiei.

Conceptul cu adoptarea raportului de suprasaturație critic de 2/1 nu este adecvat scufundărilor profunde sau de lungă durată.

Hawkins și colaboratorii au arătat că raportul de 2/1 a fost prea conservativ pentru compartimentul de țesuturi rapide și prea mare pentru compartimentul de țesuturi lente. După mii de experimentări, la adâncimi de 30 m și 60 m, aceștia au determinat valori ale raportului de suprasaturație critic funcție de diferitele compartimente de țesuturi ale organismului, prezentate în tabelul 3.3.

Tabelul 3.3 Rapoartele de suprasaturație critice R_{SC} funcție de diferitele compartimente de țesuturi caracterizate de o anumită perioadă de semisaturație *H*

Perioada de semisaturație *H* [min]	**Raport de suprasaturație critic R_{SC} [-]**
5	5,5/1
10	4,5/1
20	3,2/1
40	2,4/1
75	1,8/1 la 2/1

În anul 1937 Yarbrough a calculat și testat noi tabele pentru U.S. Navy controlând numai compartimentele de țesuturi cu perioade de semisaturație *H* de 20, 40 și 75 minute și folosind rapoartele de semisaturație critice prezentate în tabelul 3.4.

La scufundările efectuate după aceste tabele, la 2,4% dintre cei 81 de subiecți au apărut accidente de decompresie.

Van der Aue, în anul 1951, a calculat noi tabele de decompresie pentru scufundări cu aer comprimat modificând atât eșantionul de compartimente de țesuturi cât și rapoartele de suprasaturație critice. Datele sunt prezentate în tabelul 3.5.

Tabelul 3.4 Rapoartele de suprasaturație critice R_{SC} funcție de diferitele compartimente de țesuturi caracterizate de o anumită perioadă de semisaturație H

Perioada de semisaturație *H* [min]	**Raport de suprasaturație critic R_{SC} [-]**
20	2,45/1 ... 2,8/1
40	1,75/1 ... 2,0/1
75	1,75/1 ... 2,0/1

Rapoartele de suprasaturație critice folosite de Workman pentru diferitele compartimente de țesuturi, la diferite adâncimi, sunt reprezentate grafic în figura 3.10.

Din figura 3.10 se observă că rapoartele de suprasaturație critice sunt funcții hiperbolice față de adâncimea scufundării (presiunea corespunzătoare acestei adâncimi). Rapoartele superioare permit grade de desaturare mai mari pentru compartimentele de țesuturi mai rapide.

Tabelul 3.5 Rapoartele de suprasaturație critice R_{SC} funcție de diferitele compartimente de țesuturi caracterizate de o anumită perioadă de semisaturație *H*

Perioada de semisaturație *H* [min]	**Raport de suprasaturație critic R_{SC} [–]**
5	3,8 /1
10	3,4 /1
20	2,8 /1
40	2,27/1
75	2,06/1
120	2,0 /1

În figura 3.10, se remarcă modul cum a evoluat în timp concepția referitoare la modelul matematic corespunzător țesuturilor organismului uman pentru calculul procedeelor de decompresie după scufundări cu aer comprimat. Modificările au fost cerute de rezultatele experimentelor efectuate, experimente la care au avut loc accidente de decompresie la un număr mare de subiecți.

Tabelele de decompresie după scufundări cu aer comprimat ale U.S. Navy sunt valabile din anul 1960 și au fost elaborate de U.S. Navy Experimental Diving Unit.

3.3.2.2 Teoria britanică de decompresie

Hempleman, în anul 1952, a sugerat că un calcul cu un singur compartiment de țesuturi ar fi satisfăcător pentru rezolvarea problemei decompresiei. Totuși, datorită faptului că difuzia într-un țesut este un factor dominant în schimbul de gaz inert, se ridică probleme de ordin fiziologic interesante. Unele dintre acestea au fost reexaminate de Hempleman în 1967 și Hills în 1966 și reluate în 1969.

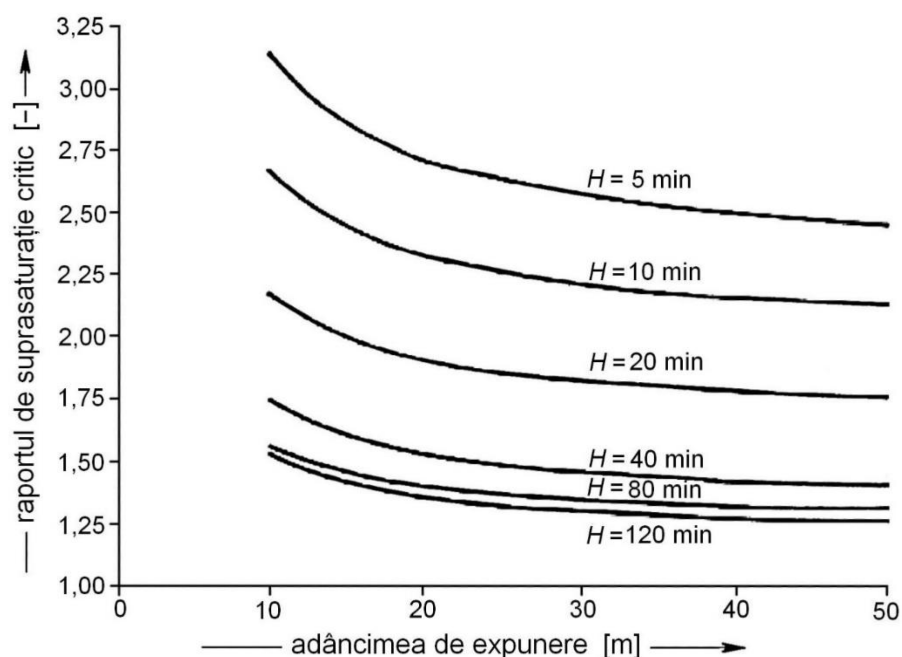


Figura 3.10 Variația rapoartelor de suprasaturație critice funcție de adâncimea scufundării pentru diferite compartimente de țesuturi caracterizate de perioada lor de semisaturație *H*

Pentru calculul decompresiei după scufundări cu aer, cercetătorii britanici au emis o serie de ipoteze care sunt enumerate în continuare:

- există o relație directă între cantitatea de azot din amestecul respirator și riscul accidentului de decompresie; conținutul de oxigen din amestecul respirator se consideră că nu face parte din etiologia accidentului de decompresie;
- sângele arterial se saturează instantaneu cu gaz inert;
- numai un singur compartiment de țesuturi participă la apariția accidentului de decompresie;
- viteza de pătrundere a gazului inert în țesuturi, pe timpul expunerii la presiune, este mai mică decât viteza cu care îl părăsește pe timpul decompresiei;
- – țesuturile pot tolera o anumită presiune de gaz inert dizolvat, în exces.

Aceste aproximări cantitative au definit algoritmul de calcul a tabelei de decompresie după scufundări cu aer comprimat. Pentru timpi de expunere la presiune sub 100 minute s-a stabilit cantitatea de gaz inert ce va fi difuzat în compartimentele de țesuturi *Q*, conform relației:

$$Q = 3,27\, p\sqrt{t} \tag{3.16}$$

unde: *p* este presiunea la care este expus organismul pe timpul scufundării [*ft* H_2O]; *t* – timpul de expunere [min].

Pentru timpi de expunere mai mari de 100 minute trebuie să se revină la ecuația difuziei.

3.3.2.3 Teoria elvețiană de decompresie

Bühlmann a luat în considerare, pentru calculul decompresiilor după scufundări cu aer comprimat, 16 compartimente de țesuturi caracterizate de diferite perioade de semisaturație. Datele sunt prezentate în tabelul 3.6.

Pentru fiecare compartiment de țesuturi, presiunea parțială a gazului inert din amestecul respirator ambiant tolerată, $P_{a,tol}$, se calculează din presiunea gazului inert dizolvat în compartimentul de țesuturi, *p*, conform relației:

$$P_{a,tol} = (p - a)b\,, \tag{3.17}$$

unde valorile lui *a* și *b* sunt prezentate în tabelul 3.6.

Tabelul 3.6 Compartimentele de țesuturi și perioadele lor de semisaturație H luate în calcul la stabilirea procedeelor de decompresie după scufundări cu aer comprimat de către A. A. Bühlmann

Compartiment de țesuturi	1	2	3	4	5
Perioada de semisaturație *H* [min]	2,650	7,940	12,200	18,500	26,500
a	2,200	1,500	1,080	0,900	0,750
b	0,830	0,820	0,825	0,835	0,860

6	7	8	9	10
37	53	79	114	146
0,580	0,470	0,455	0,455	0,455
0,860	0,870	0,890	0,890	0,934

11	12	13	14	15	16
185	238	304	397	503	635
0,455	0,380	0,255	0,255	0,255	0,255
0,934	0,944	0,962	0,962	0,962	0,962

3.3.2.4 Teoria franceză de decompresie

Pentru calculul tabelelor de decompresie după scufundări cu aer comprimat, folosite în Marina Națională a Franței, s-a utilizat metoda lui Haldane pentru compartimente de țesuturi ce au corespuns curbelor exponențiale determinate de Jones: $H =$1,5; 7,9; 29; 120 și 300 minute. Țesuturile extreme au fost eliminate din calcul, dar a fost introdus și compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație $H =$ 60 minute.

S-a plecat de la ecuația (3.10) în care constanta caracteristică compartimentelor de țesuturi λ a avut valorile prezentate în tabelul 3.7.

Tabelul 3.7 Valorile constantelor caracteristice compartimentelor de țesuturi λ luate în calculul tabelelor de decompresie ale Marinei Naționale a Franței

Perioada de semisaturație a compartimentelor de țesuturi *H* [min]	***λ***
7	0,1
30	0,0231
60	0,01153
120	0,00577

Coeficienții de suprasaturație critici C_{SC} folosiți sunt prezentați în tabelul 3.8.

În afara acestor tabele, în Franța se mai folosesc tabele ale Ministerului Muncii precum și tabele de decompresie pentru scufundări sportive. Deosebirile dintre acestea constau în creșterea gradului de securitate pentru ultimele două.

Tabelul 3.8 Coeficienții de suprasaturație critici C_{SC} pentru diferite compartimente de țesuturi caracterizate de diferite perioade de semisaturație H

Perioadele de semisaturație H [min]	**7**	**30**	**60**	**120**
Coeficienții de suprasaturație critici C_{SC} [–]	2,56	1,84	1,6	1,6

3.3.2.5 Teoria românească de decompresie

Pentru calculul procedeelor de decompresie după scufundări cu aer comprimat, specialiștii Laboratorului Hiperbar din Constanța au plecat de la experiența acumulată, în care literatura de specialitate este destul de bogată. Modelul matematic ales pentru calcule a luat în considerare compartimentele de țesuturi caracterizate de perioada de semisaturație *H* egală cu 10, 20, 40, 60, 80 și 120 minute. În legătură cu conceptul coeficientului de suprasaturație critic, pentru calculul tabelelor de decompresie după scufundări unitare se recomandă utilizarea conceptului de diferență de presiune, iar conceptul coeficientului de suprasaturație critic este mai ușor de utilizat pentru calculul tabelelor de decompresie după scufundări în saturație.

Diferențele dintre presiunea gazului inert dizolvat în compartimentele de țesuturi și presiunea parțială a aceluiași gaz din amestecul respirator, care definesc presiunile maxime admisibile ale gazului dizolvat funcție de adâncime, luate în calcul, sunt prezentate în tabelul 3.9.

Tabelul 3.9 Presiunea maximă admisibilă p_{adm} a azotului în compartimentele de țesuturi luate în calcul pentru elaborarea tabelelor de decompresie după scufundări cu aer comprimat

Adâncimea [m]	**Perioada de semisaturație *H* [min]**					
	10	20	40	60	80	120
	Presiunea totală maximă admisibilă p_{adm} [dm H_2O (sc.abs.)*]					
3	265	216	172	167	162	156
6	314	261	213	206	199	192
9	363	306	254	245	236	228
12	412	351	295	284	273	264
15	461	396	336	328	310	300
18	510	441	377	362	347	336
21	559	486	418	401	384	372

*) 1 dm H_2O =10^{-2} bar (ex.: 372 dm H_2O = 3,72 bar).

Pe tot timpul decompresiei, presiunea gazului inert dizolvat în țesuturile organismului trebuie să fie mai mică sau cel mult egală cu presiunea maximă admisibilă pentru compartimentul de țesuturi respectiv ($p_{ht} \le p_{adm}$).

Decompresia (revenirea la presiunea atmosferică) se poate realiza în trepte (cu paliere de decompresie) sau în mod continuu. În general, pentru scufundări unitare autonome sau de sistem până la adâncimea de 120 m, decompresia se realizează în trepte, în timp ce pentru scufundări unitare de sistem la adâncimi de peste 120 m și pentru scufundări în saturație, decompresia se realizează în mod continuu. Totuși, aceasta nu este o regulă generală pentru că sunt unele școli de scufundare (școala britanică) care conduc decompresii în trepte după scufundări în saturație (întrerup decompresia pe timpul nopții). Această creștere a precauțiilor pentru reducerea eventualelor accidente de decompresie, din experiența autorilor, nu se justifică.

3.3.3 Decompresia în trepte

Decompresia în trepte este caracteristică pentru scufundările unitare autonome și de sistem până la adâncimea de 120 m și se realizează în două etape:

- ridicarea la primul palier de decompresie;
- efectuarea palierelor de decompresie propriu-zise.

Ridicarea la primul palier de decompresie se realizează cu viteza de 15...17 m/min. Din acest punct de vedere, școlile de cercetări hiperbare au păreri unanime. Majoritatea tabelelor de decompresie sunt calculate pentru viteza de ridicare la primul palier de 15 m/min. Aceeași viteză a fost adoptată și de specialiștii Laboratorului Hiperbar din Constanța la calculul tabelelor de decompresie după scufundări unitare.

Pe timpul ridicării la primul palier de decompresie și chiar pe timpul primelor paliere, compartimentele de țesuturi ale organismului uman, care compun modelul matematic de calcul, se comportă diferit. Compartimentele de

țesuturi rapide se desaturează de gazul inert dizolvat, în timp ce compartimentele de țesuturi lente continuă să se satureze cu gaz inert.

a. Determinarea primului palier de decompresie

Pentru determinarea primului palier de decompresie trebuie să se revină la noțiunea definită anterior, presiunea maximă admisibilă a gazului inert dizolvat în țesuturi, p_{adm}. Valoarea acestei presiuni, stabilită inițial pe cale experimentală, a fost, după cum s-a arătat, îmbunătățită de mulți autori, fără a se îndepărta prea mult de datele inițiale și a fost testată, prin tabelele de decompresie rezultate, pe subiecți cu particularități individuale specifice zonelor de lucru. Variația valorilor presiunii maxime admisibile a gazului inert dizolvat în țesuturile organismului uman folosite pentru calculul tabelelor de decompresie LH–82, elaborate de Laboratorul Hiperbar din Constanța sunt prezentate în figura 3.11.

În figura 3.12 este reprezentată variația presiunii maxime admisibile a gazului inert (azotului) dizolvat în compartimentele de țesuturi folosite în calculul tabelelor de decompresie ZH – L_{12}, elaborate de Laboratorul de Fiziologie Hiperbară a Clinicii Universității din Zürich. Atât în figura 3.11 cât și în figura 3.12, variația presiunilor maxime admisibile ale gazului inert dizolvat în țesuturi este funcție de modelul matematic utilizat.

Tabelele de decompresie LH – 82, elaborate și testate în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța, au fost calculate în anul 1982, iar A. A. Bühlmann și-a publicat rezultatele cercetărilor pentru tabelele de decompresie ZH – L_{12} în 1984.

Nu este lipsită de interes o comparație între cele două reprezentări (figura 3.11 și figura 3.12). Spre exemplificare, se alege palierul de la adâncimea de 21 m [3,1 bar (sc. abs.)] și se compară valorile presiunilor maxime admisibile p_{adm} din compartimentele de țesuturi luate în calcul. Datele sunt prezentate în tabelul 3.10 și reprezentate grafic în figura 3.13.

Tabelul 3.10 Comparație între valorile presiunilor maxime admisibile ale gazului inert (azotului) dizolvat în compartimentele de țesuturi luate în calcul de Laboratorul Hiperbar din Constanța pentru tabelele de decompresie LH – 82 și de Bühlmann pentru tabelele de decompresie ZH – L12

Tabelele	Date comparative (palierul de la 21 m)							
LH-82	H	5	10	20	40	80	120	160
	p_{adm}	6,46	5,59	4,86	4,18	3,81	3,72	3,57
ZH-L_{12}	H	3-8	12,2	18,5	37	79	114	146...185
	p_{adm}	5,8...5,15	4,7	4,5	4,1	3,85	3,85	3,80

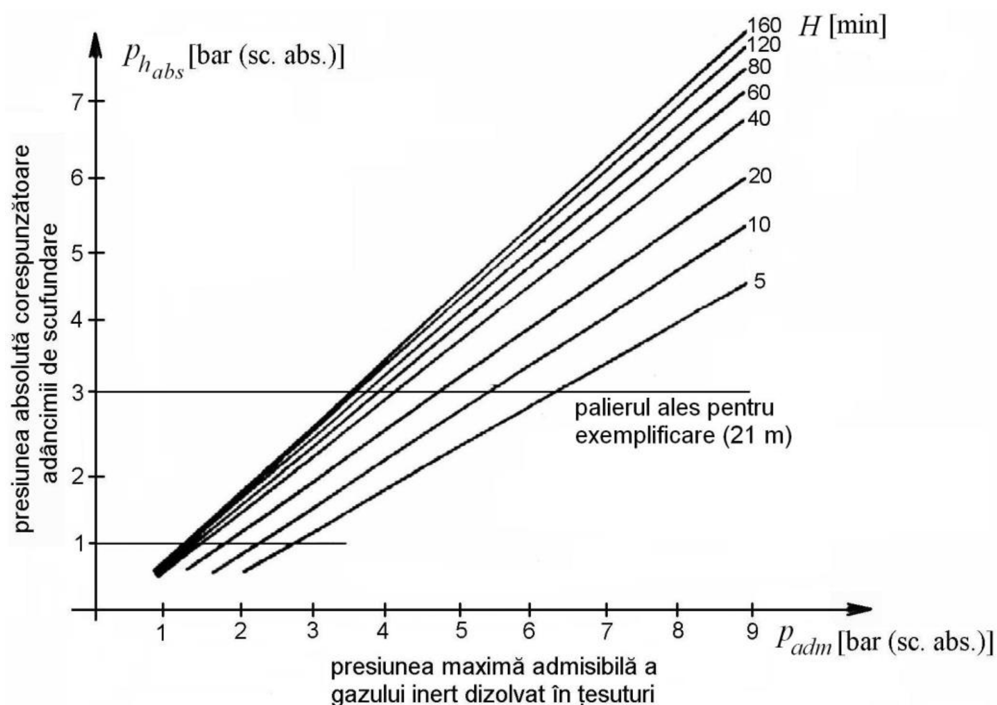


Figura 3.11 Variația valorilor presiunii maxime admisibile a gazului inert (azotului) dizolvat în compartimentele de țesuturi ale organismului uman folosite pentru calculul decompresiilor după scufundări unitare în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța

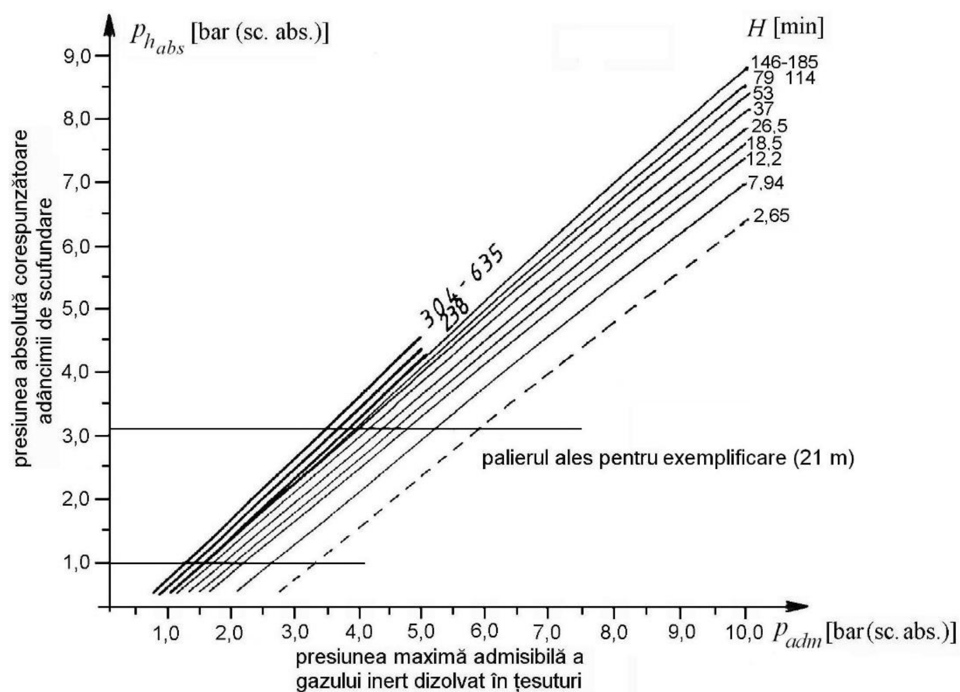


Figura 3.12 Variația presiunii maxime admisibile a gazului inert (azotului) dizolvat în compartimentele de țesuturi ale organismului uman folosite în calculul tabelelor de decompresie ZH – L12, elaborate de Laboratorul de Fiziologie Hiperbară din Zürich

S-a realizat comparația rezultatelor cercetărilor efectuate în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța cu rezultatele cercetărilor efectuate de colectivul de specialiști condus de A.A. Bühlmann în cadrul Laboratorului Hiperbar din Zürich, deoarece acestea din urmă sunt recunoscute pe plan mondial datorită experienței acumulate în utilizarea amestecurilor respiratorii NITROX pentru scufundare în lacurile elvețiene, atât cu plecare de la nivelul presiunii atmosferice cât și de la altitudine.

Analizând graficele din figurile 3.11, 3.12 și 3.13 se remarcă o oarecare diferență între modelele matematice utilizate cât și între presiunile maxime admisibile ale gazului inert (azotului) dizolvat în țesuturile organismului uman. Pentru compartimentele de țesuturi cu perioada de semisaturație de până la 80 minute, pentru țesuturile rapide și medii, modelul matematic folosit la elaborarea tabelelor LH – 82 acceptă presiuni admisibile mai mari. Situația se inversează pentru țesuturile lente, cu perioade de semisaturație mai mari de 80 minute. Totuși, diferențele nu sunt semnificative.

Pentru calculul decompresiei după scufundări unitare autonome cu amestecuri respiratorii NITROX, s-au generalizat treptele de decompresie din 3 în 3 m, ceea ce corespunde unei diferențe de presiune nepericuloase pentru țesuturile organismului uman. Primul palier de decompresie se stabilește acolo unde, pentru prima dată, presiunea p_{ht} depășește valoarea presiunii admisibile p_{adm}.

Din analiza datelor prezentate mai sus se va alege ca prim palier de decompresie palierul cel mai profund, care este acoperitor pentru toate celelalte adâncimi de palier.

b. Determinarea caracteristicilor compartimentelor de țesuturi la sosirea la primul palier

Odată stabilit primul palier de decompresie, înainte de a se trece la calculul timpului de staționare la fiecare palier, până la revenirea la presiunea atmosferică, trebuie determinate caracteristicile compartimentelor de țesuturi în momentul sosirii la acest palier. Pentru calcule s-a plecat de la următoarele date:

- viteza de ridicare la primul palier care este de 15 m/min;
- presiunea parțială a gazului inert din amestecul respirator care este definită ca o medie între presiunea parțială de la adâncimea maximă a scufundării și de la adâncimea corespunzătoare primului palier; în exemplul de față:

$$p_{\mathrm{hgi}} = \frac{p_{30\mathrm{gi}} + p_{6\mathrm{gi}}}{2} = \frac{3,2+1,28}{2} = 2,24\ \mathrm{bar}(\mathrm{sc.abs.});$$

- timpul de expunere al organismului uman la această presiune care este timpul în care se ajunge la primul palier de decompresie; în cazul de față:

$$t = \frac{30-6}{15} = 1,6 \text{ min};$$

- presiunea parțială a gazului inert din amestecul respirator p_{gi} care, la decompresie, devine egală cu presiunea aceluiași gaz dizolvat în țesuturile organismului de la palierul de presiune imediat superior.

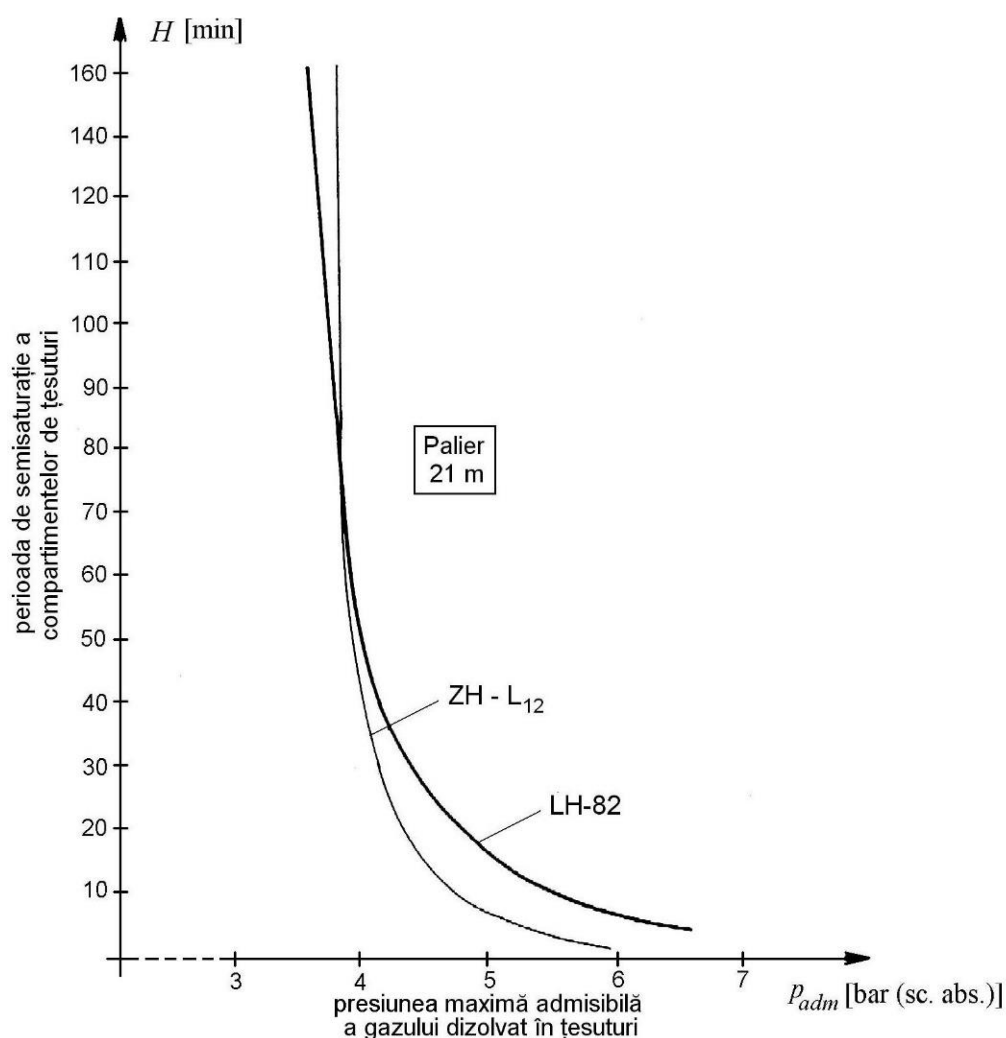


Figura 3.13 Comparație între variația presiunilor maxime admisibile pentru diferite compartimente de țesuturi ale organismului uman, caracterizate prin perioada lor de semisaturație cu gaz inert, în decompresii după scufundări cu aer comprimat, funcție de presiunea ambiantă, după A.A. Bühlmann (ZH-L_{12}) și după specialiștii Laboratorului Hiperbar din Constanța (LH-82)

Analizând rezultatele, se constată că pe timpul ridicării spre primul palier nu toate țesuturile încep să se desatureze. Compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație $H=$ 80 minute continuă să dizolve gaz inert ($\Delta p_{gi} > 0$), în timp ce compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație $H=$ 10 minute se desaturează suficient pentru a permite revenirea până la presiunea atmosferică.

c. Calculul palierelor de decompresie

Pentru calculul palierelor de decompresie trebuie determinate următoarele elemente:

- fracțiunea de gaz inert F ce trebuie eliminată din țesuturile organismului la palierul de decompresie:

$$F = \frac{p_{\mathrm{adm}} - p_{\mathrm{ht}}}{\Delta p_{\mathrm{gi}}} = \frac{p_{\mathrm{adm}} - p_{\mathrm{ht}}}{p_{\mathrm{hgi}} - p_{\mathrm{gi}}}, \tag{3.18}$$

unde p_{adm} - este presiunea maximă admisibilă a gazului inert dizolvat în țesuturi la palierul respectiv [bar (sc. abs.)];

p_{ht} - presiunea totală a gazului inert dizolvat într-un compartiment de țesuturi la presiunea absolută corespunzătoare adâncimii de scufundare, după timpul *t* de expunere, sau corespunzătoare palierului imediat superior [bar (sc. abs.)];

Δp_{gi} - diferența de presiune dintre presiunea parțială a gazului inert din amestecul respirator de la presiunea corespunzătoare palierului de decompresie p_{hgi} și presiunea aceluiași gaz dizolvat în țesuturile organismului p_{gi} ($\Delta p_{gi} = p_{hgi} - p_{gi}$) [bar].

Cu ajutorul relației:

$$F = 1 - 0,5^{u} = 1 - 0,5^{t/H}, \tag{3.19}$$

unde *t* este timpul necesar de staționare la palierul de decompresie pentru eliminarea fracțiunii de gaz inert *F* dizolvat în compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație *H*. Logaritmând relația (3.19) se obține expresia timpului de staționare la palierul respectiv de decompresie:

$$t = -1,44 H \ln(1 - F), \tag{3.20}$$

unde F este calculat cu relația (3.18).

Din acest moment, noua presiune parțială a gazului inert din compartimentele de țesuturi ale modelului matematic, va fi egală cu presiunea admisibilă pentru noul palier, dar numai în cazul în care acest compartiment

dirijează decompresia, compartiment de țesuturi care necesită timpul cel mai mare de staționare la palierul respectiv. În general, procedeul de decompresie este dirijat de un singur compartiment de țesuturi despre care se spune că este *compartimentul de țesuturi director al decompresiei*.

d. Timpul după care nu mai există pericol de accidente de decompresie

Pentru scufundări unitare cu aer comprimat până la adâncimea de 60 m, compartimentul de țesuturi director al decompresiei este cel cu perioada de semisaturație $H =$ 40 minute. Se cunoaște că un compartiment de țesuturi este saturat cu gaz inert când raportul $t/H = 6$. Cum desaturarea se produce după aceeași curbă exponențială, se poate aprecia că compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație $H =$ 40 minute se desaturează după 40 × 6 = 240 minute, adică după 4 ore. În concluzie, pentru securitatea scafandrilor, după revenirea la presiunea atmosferică, aceștia trebuie să rămână în apropierea unei barocamere de recompresie terapeutică încă aproximativ 4 ore. Tratamentul accidentelor de decompresie se face numai prin recomprimare și oxigenoterapie hiperbară.

Pentru scufundări unitare cu amestecuri HELIOX până la adâncimea de 120 m, intervalul de 4 ore de staționare în apropierea unei barocamere de recompresie poate fi considerat, de asemenea, acoperitor pentru prevenirea accidentelor de decompresie după revenirea la presiunea atmosferică.

e. Timpul după care se poate executa o nouă scufundare cu caracteristicile primei scufundări

Scufundările unitare cu aer comprimat până la adâncimea de 60 m sunt considerate scufundări cu expuneri de scurtă durată, care corespund saturării compartimentelor de țesuturi cu perioade de semisaturație $H =$ 80 minute. În această situație, compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație $H =$ 80 minute se consideră desaturat după 80 × 6 = 480 minute, adică după 8 ore. În concluzie, pentru securitatea scafandrilor, aceștia nu pot executa o nouă scufundare cu caracteristicele celei precedente decât după 8 ore de staționare la presiunea atmosferică. Orice scufundare executată la un interval mai mic de 8 ore este considerată *scufundare succesivă*, iar revenirea la presiunea atmosferică se face după o altă tabelă de decompresie, în calculul căreia se ține cont de gazul inert remanent în țesuturile organismului uman la începutul scufundării succesive.

Scufundările unitare cu amestecuri HELIOX până la adâncimea de 120 m sau mai mult, sunt considerate scufundări cu expuneri de durată medie, care corespund saturării compartimentelor de țesuturi cu perioada de semisaturație $H =$ 120 minute, sau chiar mai mult. În aceste condiții, nu se poate executa o nouă scufundare decât după minimum 120 × 6 = 720 minute, adică după 12 ore de staționare la presiunea atmosferică. Deoarece, în timpul expunerii la presiunea ambiantă ridicată, pot interveni și compartimente de țesuturi cu

perioade de semisaturație mai mari $H=$ 120 minute, se poate considera ca interval de securitate, între două scufundări unitare profunde cu amestecuri respiratorii HELIOX, intervalul de 24 ore.

f. Timpul după care scafandrul revenit la presiunea atmosferică dintr-o scufundare, poate părăsi zona șantierului subacvatic cu avionul sau alt mijloc de zbor

Ridicarea la altitudini de peste 2500...3000 m, după o scufundare, poate provoca accidente de decompresie.

Timpul de staționare la presiunea atmosferică înaintea efectuării unui zbor cu avionul se calculează funcție de caracteristicile scufundării efectuate (adâncime, amestec respirator utilizat și timp de expunere a organismului la presiune), de presiunea remanentă a gazului inert din compartimentul de țesuturi director al decompresiei și de amestecul respirator folosit pe timpul staționării la presiunea atmosferică înaintea efectuării zborului (respirarea amestecurilor supraoxigenate sau a oxigenului pur reduce timpul de staționare necesar înaintea efectuării zborului). Acest aspect este important de cunoscut pentru că riscul de apariție a accidentelor este proporțional cu altitudinea zborului.

3.3.4 Decompresia continuă

Decompresia continuă este caracteristică pentru scufundările unitare la adâncimi de peste 120 m și pentru scufundările în saturație. După ambele tipuri de scufundări, problema revenirii la presiunea atmosferică se pune aproximativ la fel, motiv pentru care, în cele ce urmează atenția va fi îndreptată asupra decompresiilor după scufundări în saturație. Se reamintește faptul că scufundarea în saturație este acea scufundare în care timpul de expunere a organismului uman la presiunea ambiantă este suficient de mare pentru ca toate țesuturile acestuia să se satureze în gazul sau gazele inerte din amestecul respirator. În această situație, revenirea la presiunea atmosferică este dictată de țesutul cu perioada de semisaturație *H* cea mai mare.

Saturarea și desaturarea țesuturilor umane sunt procese ce depind de natura gazului inert din amestecul respirator, considerând că restul variabilelor (presiune, temperatură și chiar organism uman) rămân aceleași. În aceste condiții, se poate trata calculul decompresiei continue din punctul de vedere al celor două gaze inerte cel mai des utilizate în scufundări în saturație: heliul și azotul.

Indiferent de natura gazului inert folosit ca diluant al oxigenului, decompresia după scufundări în saturație are două faze distincte: saltul și decompresia lentă.

Saltul reprezintă o decompresie rapidă, în primii metri spre suprafață, cu viteza de 1 m/min. În legătură cu posibilitatea de utilizare a saltului, părerile sunt împărțite, în sensul că mulți cercetători consideră saltul o cauză a accidentelor

de decompresie. Din experiența cercetătorilor din cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța, la scufundări în saturație cu amestecuri respiratorii NITROX, saltul nu este o cauză a accidentelor de decompresie, ci dimpotrivă, facilitează decompresia în primul interval de adâncimi, prin stabilirea mai rapidă a gradientului de presiune maxim admisibil.

Decompresia lentă reprezintă acea parte a revenirii la presiunea atmosferică în care se adoptă condiția ca presiunea gazului inert dizolvat în compartimentul de țesuturi cu semiperioada de saturație cea mai lungă să nu fie mai mare decât cea admisibilă, materializată prin coeficientul de suprasaturație critic care definește viteza ce trebuie adoptată.

Pentru a se putea calcula vitezele de revenire la presiunea atmosferică după o scufundare în saturație cu amestecuri respiratorii HELIOX, este necesar să se stabilească o serie de elemente prezentate în continuare.

a. Stabilirea compartimentului de țesuturi cu perioada de semisaturație cea mai lungă

În ceea ce privește heliul ca diluant al oxigenului în amestecurile respiratorii, părerile cercetătorilor din întreaga lume sunt unanime, recunoscând compartimentele de țesuturi cu perioada de semisaturație de 240 minute și 300 minute ca fiind compartimentele de țesuturi cu perioadele de semisaturație cele mai lungi. În calculul tabelelor de decompresie elaborate în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța, s-a luat în considerare compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație de 300 minute.

b. Determinarea nivelului maxim al presiunii parțiale a oxigenului în amestecul respirator HELIOX

Este cunoscut faptul că, cu cât concentrația oxigenului din amestecul respirator este mai mare, cu atât durata decompresiei este mai mică, dar nu trebuie neglijat faptul că oxigenul este toxic și toxicitatea lui este proporțională cu presiunea sa parțială și cu timpul cât este inspirat.

În calculul timpului de revenire la presiunea atmosferică trebuie ținut cont de doza de toxicitate pulmonară a oxigenului (UPTD). Spre exemplu, pentru revenirea după scufundări în saturație de la adâncimi de până la 300 m, se poate utiliza, fără risc, o presiune parțială a oxigenului în amestecul respirator de 0,6 bar (sc. abs.) $[p_{O_2} = 600 \text{ mbar}(\text{sc.abs.})]$. La adâncimi de peste 300 m, de unde timpul de revenire la presiunea atmosferică depășește 5 zile, presiunea parțială a oxigenului din amestecul respirator de 0,6 bar (sc. abs.) $[p_{O_2} = 600 \text{ mbar}(\text{sc.abs.})]$ nu mai poate fi folosită pe toată perioada decompresiei, urmând ca în prima parte a acesteia să se revină cu o presiune parțială a oxigenului de maxim 0,5 bar (sc. abs.) $[p_{O_2} = 500 \text{ mbar}(\text{sc.abs.})]$, presiune parțială tolerabilă timp îndelungat. Tabelele de decompresie după scufundări în saturație cu amestecuri respiratorii HELIOX au fost elaborate de

specialiștii Laboratorului Hiperbar din Constanța astfel încât, pentru fiecare tip de scufundare se poate determina, funcție de necesități, o tabelă de decompresie specifică, optimă.

c. Determinarea căderii de presiune admisibilă, tolerată de țesuturile organismului uman, la decompresie

În figura 3.14 este reprezentată *căderea de presiune admisibilă* funcție de presiunea la care este expus organismul uman pe timpul scufundărilor profunde.

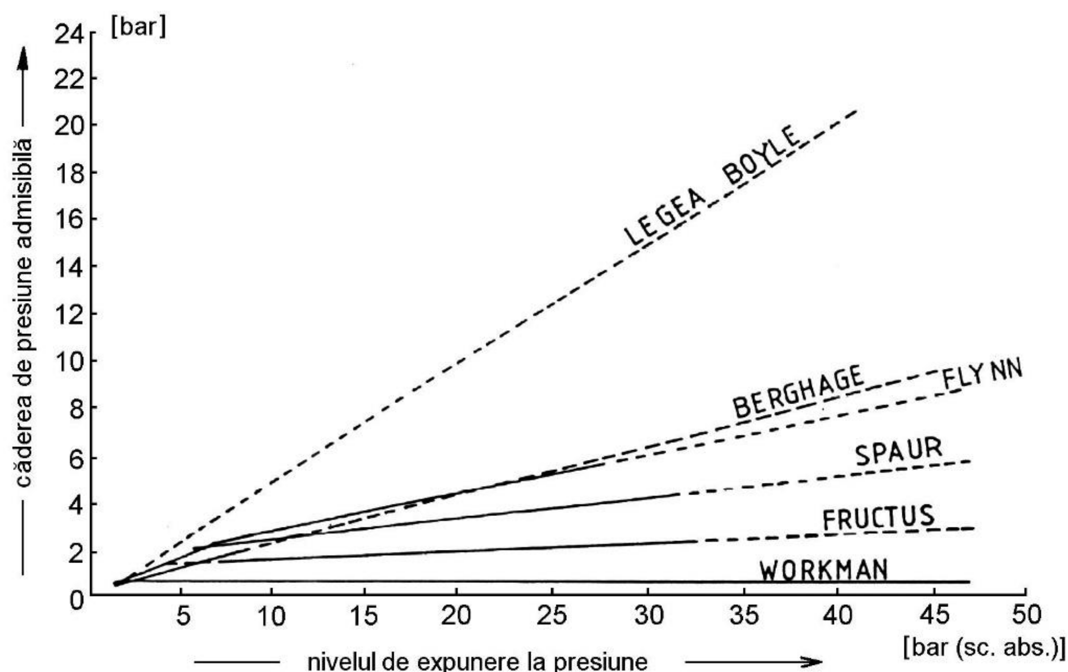


Figura 3.14 Căderea de presiune admisibilă, estimată de diferiți cercetători, pentru organismul uman, funcție de presiunea la care este expus pe timpul scufundărilor. Linia continuă reprezintă datele actuale verificate, iar linia discontinuă reprezintă o extrapolare a datelor existente

Se remarcă faptul că există păreri diferite în ceea ce privește căderea de presiune admisibilă. Din aceste estimări, s-a determinat valoarea coeficientului de suprasaturație critic necesar pentru calculul tabelelor de decompresie. Coeficientul de suprasaturație critic C_{SC} reprezintă raportul dintre presiunea maximă a gazului inert dizolvat în compartimentul de țesuturi al modelului matematic folosit și presiunea parțială a aceluiași gaz din amestecul respirator, care permite degazarea țesuturilor fără formare de bule.

În figura 3.15 este prezentată căderea de presiune admisibilă folosită de specialiștii Laboratorului Hiperbar din Constanța pentru determinarea coeficienților de suprasaturație critici C_{SC} ai compartimentului de țesuturi cu perioada de semisaturație de 300 minute. Din analiza rezultatelor obținute de cercetători din întreaga lume, s-a observat că nu este vorba despre un coeficient

de suprasaturație critic C_{SC} constant în raport cu presiunea la care este expus organismul pe timpul scufundării, ci de un coeficient ce variază cu presiunea. La adâncimi foarte mari, valoarea acestui coeficient se apropie de 1, iar spre suprafață (către presiunea atmosferică) se apropie de 3.

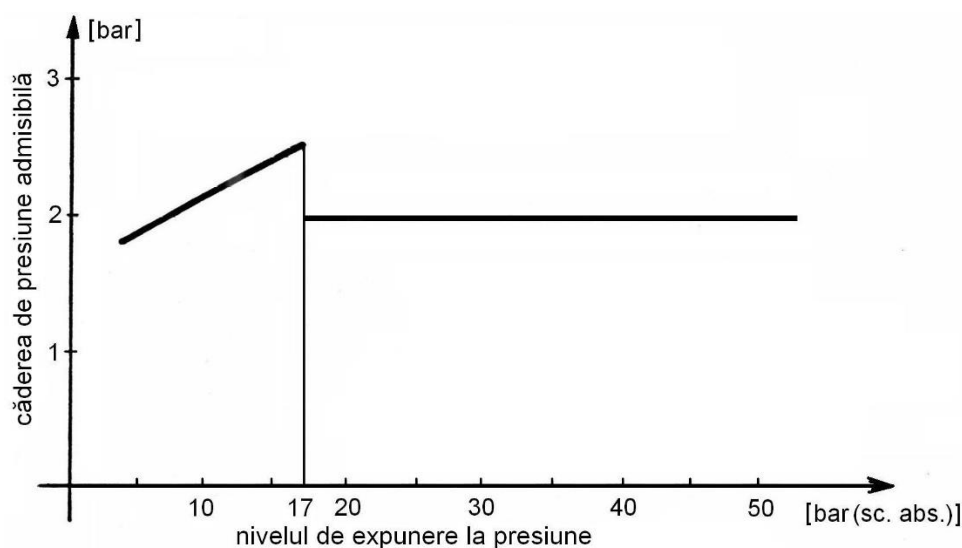


Figura 3.15 Căderea de presiune admisibilă folosită de specialiștii Laboratorului Hiperbar din Constanța, funcție de presiunea la care este expus organismul uman în timpul scufundărilor

Analizând graficul din figura 3.15, se remarcă faptul că apare un prag la nivelul presiunii de 17 bar (sc. abs.). Acest prag se datorează faptului că s-a ținut cont, la stabilirea căderii de presiune admisibile, de faptul că presiunea parțială a gazului inert din amestecul respirator scade prin creșterea presiunii parțiale a oxigenului de la 0,5 bar (sc. abs.) $[p_{O_2} = 500 \text{ mbar (sc.abs.)}]$ la 0,6 bar (sc. abs.) $[p_{O_2} = 600 \text{ mbar (sc.abs.)}]$.

Calculul tabelelor de decompresie după scufundări în saturație cu amestecuri HELIOX până la adâncimea de 500 m a fost efectuat după modelul "suprasaturație – 300", unde cifra 300 reprezintă perioada de semisaturație a compartimentului de țesuturi considerat ca fiind compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație cea mai lungă. Cea mai apropiată abordare a decompresiei rămâne la presupunerea că, în transportul materiei prin mișcarea moleculară față de regiunile cu concentrații variabile, presiunea este dirijată de gradientul local. Pentru un corp uman uniform, așa cum s-a arătat anterior, viteza de modificare a presiunii gazului este proporțională cu diferența dintre presiunea parțială a gazului inert inspirat p_i și presiunea instantanee a gazului dizolvat *p*. Presupunând, la echilibru, presiunea parțială a gazului inert din amestecul respirator și presiunea acestui gaz dizolvat în artere se obține:

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t} = -\lambda(p - p_i)\,, \tag{3.21}$$

unde λ este un coeficient caracteristic compartimentului de țesuturi cu perioada de semisaturație de 300 minute.

Integrând ecuația de mai sus și luând la $t = 0$, $p = p_0$ se obține:

$$p - p_i = (p_0 - p_i)\,\exp(-\lambda t)\,. \tag{3.22}$$

Pentru modelul "suprasaturație – 300", coeficientul caracteristic compartimentului de țesuturi luat în calculul tabelelor de decompresie este:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{H} = \frac{0,693}{300} = 2,3 \cdot 10^{-3}\,.$$

Valorile coeficienților de suprasaturație critici C_{SC} folosiți de specialiștii Laboratorului Hiperbar din Constanța pentru calculul decompresiei după scufundări în saturație cu amestec respirator HELIOX la adâncimea de 500 m, au variat între 1,04 și 3. Variația acestora, funcție de adâncime, este prezentată în figura 3.16.

d. Stabilirea mărimii saltului la începutul decompresiei

Mărimea saltului la începutul decompresiei se stabilește prin compararea presiunii maxime admisibile a gazului inert dizolvat în compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație de 300 minute cu presiunea parțială a aceluiași gaz din amestecul respirator ambiant. Saltul se poate executa până la adâncimea corespunzătoare unei presiuni admisibile a gazului inert dizolvat în compartimentul de țesuturi egală cu presiunea parțială a acestuia din amestecul respirator, dar numai la începutul decompresiei. Valoarea saltului este dată sub formă tabelară, funcție de presiunea ambiantă a nivelului de viață (presiunea de staționare în barocamere).

Aceste date fiind cunoscute, se poate trece la calculul tabelei de decompresie conform metodologiei prezentate pentru scufundările unitare autonome cu aer. Calculul se execută din metru în metru determinându-se, pe anumite intervale de adâncimi, o viteză medie de revenire la presiunea atmosferică.

În cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța (figura 3.17) au fost efectuate în perioada analizată, 17 scufundări în saturație cu amestecuri respiratorii HELIOX, ceea ce au reprezentat 68 de decompresii. Scufundările au fost executate după două tehnologii, una franceză pentru scufundări până la adâncimea de 300 m și una românească pentru scufundări până la adâncimea de 500 m.

Cu tehnologia franceză, în perioada analizată s-au efectuat 11 scufundări în urma cărora s-au realizat 44 de decompresii înregistrându-se 7 accidente de

decompresie, ceea ce a reprezentat o incidență a accidentelor de 15,9%. Profilele acestor decompresii sunt prezentate în figura 3.18. Cea mai dificilă decompresie a fost la scufundarea a 5-a efectuată la adâncimea de 200 m, la care s-au înregistrat dese accidente marcate prin recompresiile efectuate și chiar un accident după revenirea la presiunea atmosferică, aceasta necesitând o recompresie la adâncimea de 18 m. Din teoria franceză asupra decompresiei după scufundări în saturație, acest ultim accident nu ar fi trebuit să fie posibil.

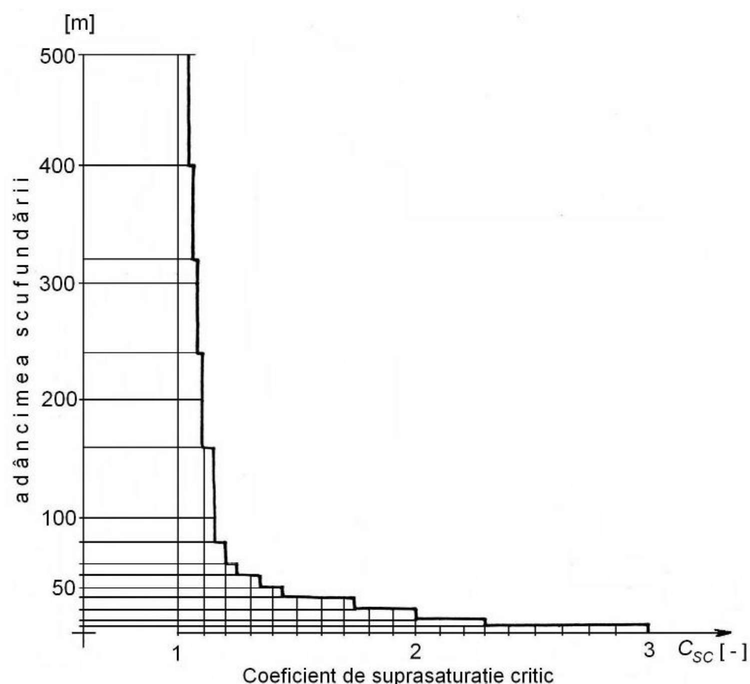


Figura 3.16 Variația coeficientului de suprasaturație critic C_{SC} funcție de adâncimea scufundării. Aceste date au fost stabilite pentru calculul decompresiei după scufundări în saturație până la adâncimea de 500 m, cu amestecuri respiratorii HELIOX



Figura 3.17 Ansamblul de scufundare simulată aferent Laboratorului Hiperbar din Constanța

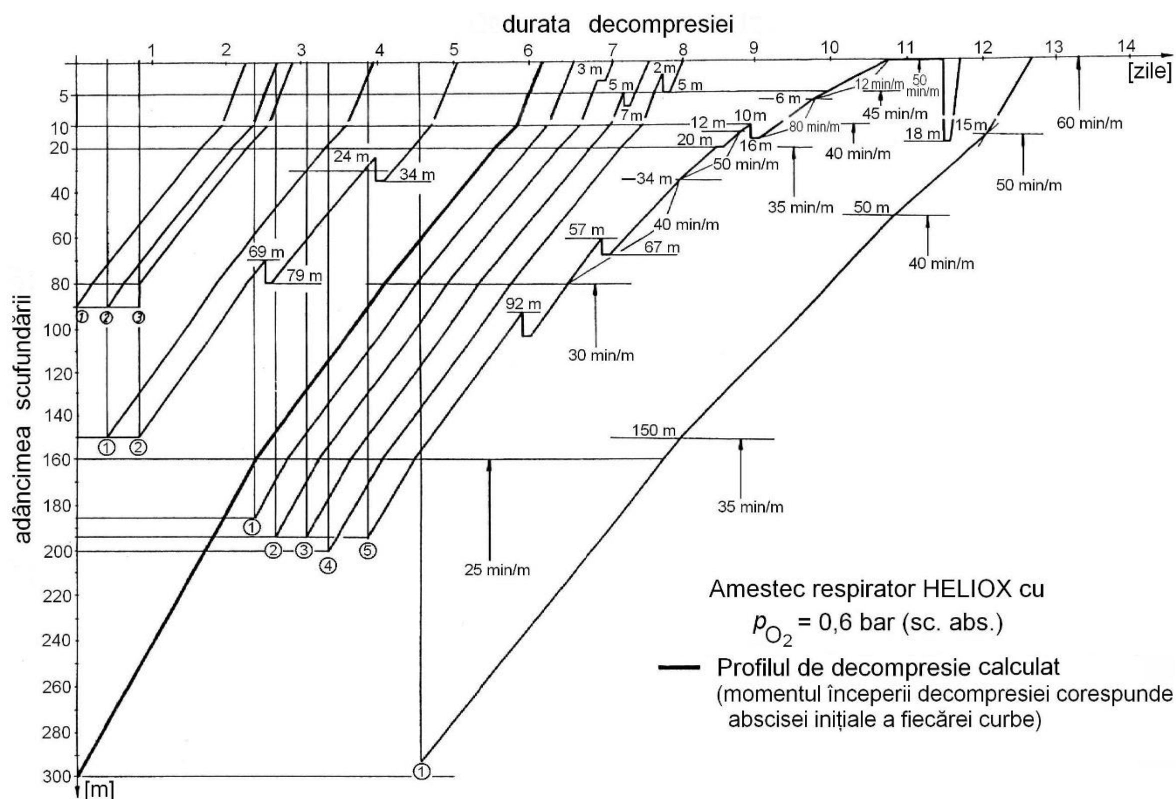


Figura 3.18 Profile de decompresie executate în Laboratorul Hiperbar din Constanța după tabele COMEX – Franța

Pe timpul decompresiei după o scufundare în saturație la adâncimea de 200 m (figura 3.19) și după o scufundare la adâncimea de 300 m (figura 3.20), s-au detectat bulele circulante de gaz inert din aparatul circulator. Detecția s-a realizat cu ajutorul unui aparat cu ultrasunete bazat pe efectul Doppler.

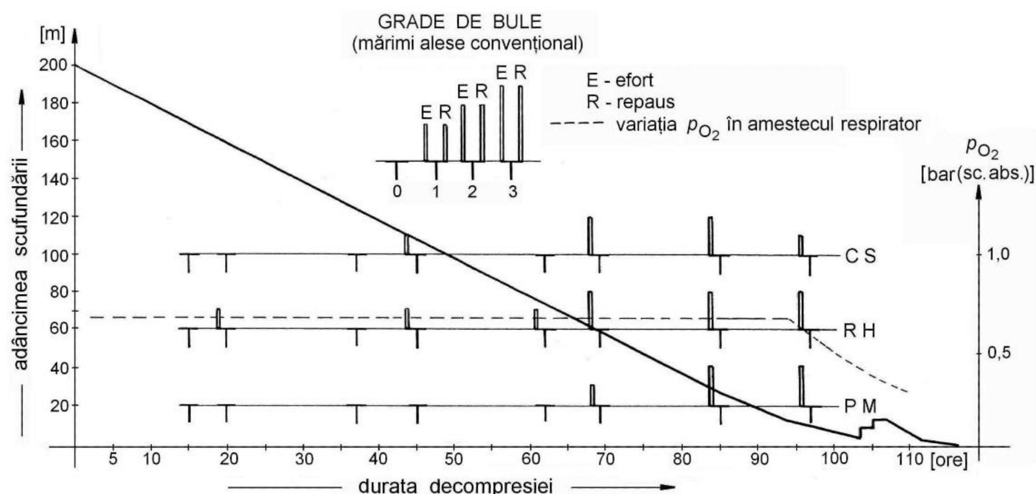


Figura 3.19 Detecția de bule circulante pe timpul decompresiei după o scufundare în saturație la adâncimea de 200 m

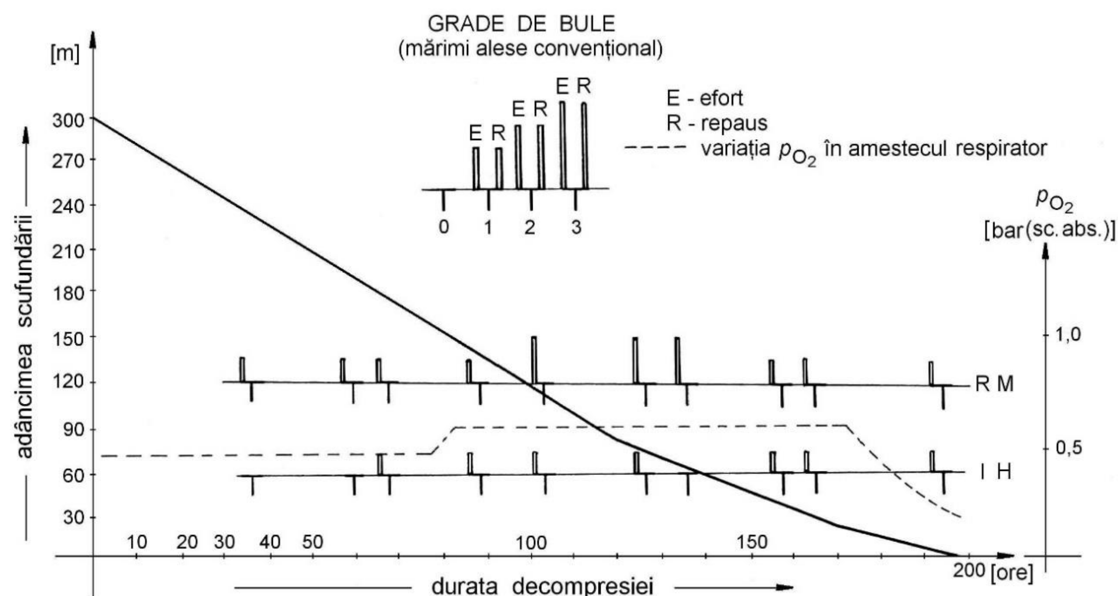


Figura 3.20 Detecția de bule circulante pe timpul decompresiei după scufundare în saturație la adâncimea de 300 m

Aparatul Doppler cuprinde, în principiu, trei elemente și anume sonda ultrason cu o frecvență de 5 Mhz, un detector și un sistem de ascultare și înregistrare. Sonda este plasată în lungul marginii stângi a sternului, la nivelul celui de al treilea spațiu intercostal, ca în figura 3.21. Operatorul va dirija fascicolul de ultrasunete astfel încât să se elimine reflexiile pe zonele mobile ca pereții ventriculari și zgomotele datorate efectelor de turbulență din curentul sanguin. Acest procedeu permite detectarea de bule cu un diametru de peste 50 microni.



Figura 3.21 Controlul securității decompresiei prin detecția de bule efectuată de către un scafandru aflat într-o barocameră, pe perioada decompresiei

Principiul de funcționare a aparatului Doppler (figura 3.22) are la bază faptul că fascicolul de ultrasunete emis de sonda ultrason penetrează țesuturile. Dacă ultrasunetele nu întâlnesc o variație de mediu (bule de gaz în țesuturi sau în sânge), ele sunt deviate sau chiar reflectate. Existența unei faze gazoase într-un țesut reprezintă o discontinuitate și deci o variație brutală de mediu, ceea ce va conduce la o reflectare bună a ultrasunetelor. Se mai spune că o bulă reprezintă o variație brutală de impedanță. Ultrasunetele reprezintă o undă emisă cu o frecvență proprie. Dacă o undă se reflectă pe un obstacol aflat în mișcare, frecvența sa se modifică. Această modificare de frecvență este legată de viteza obstacolului. Deci, când lovesc o bulă de gaz, ca urmare a vitezei bulei, frecvența ultrasunetelor se modifică. Se compară deci semnalul emis și semnalul primit și decalajul în frecvență dă semnalul Doppler. Semnalul rezultat este în gama de frecvențe auzibile, urechea umană fiind un excelent mijloc de analiză și deci un detector de bule.

Metoda de detecție a bulelor cu aparatul Doppler este standardizată, primirea de semnale făcându-se în general în repaus și apoi la efort (trei flexări totale ale picioarelor). Semnalele, în banda auzibilă, pot fi înregistrate pe un magnetofon. După receptarea semnalelor acustice ale bulelor, se trece la clasarea lor după o scară. Pentru aceasta, se poate utiliza codul Spencer bazat pe frecvența de apariție a bulelor în raport cu sistolele. Astfel, gradul 0 reprezintă absența totală a semnalelor de bule, gradul 1 reprezintă apariția câtorva semnale de bule distanțate și în cicluri cardiace întâmplătoare, gradul 2 corespunde semnalelor de bule izolate sau în grupuri în cel puțin jumătate din ciclurile cardiace, gradul 3 corespunde faptului că, practic, toate ciclurile cardiace conțin semnale de bule, dar care nu acoperă zgomotele normale ale inimii, iar gradul 4 este caracterizat printr-un flux continuu de semnale de bule acoperind zgomotele normale ale inimii.

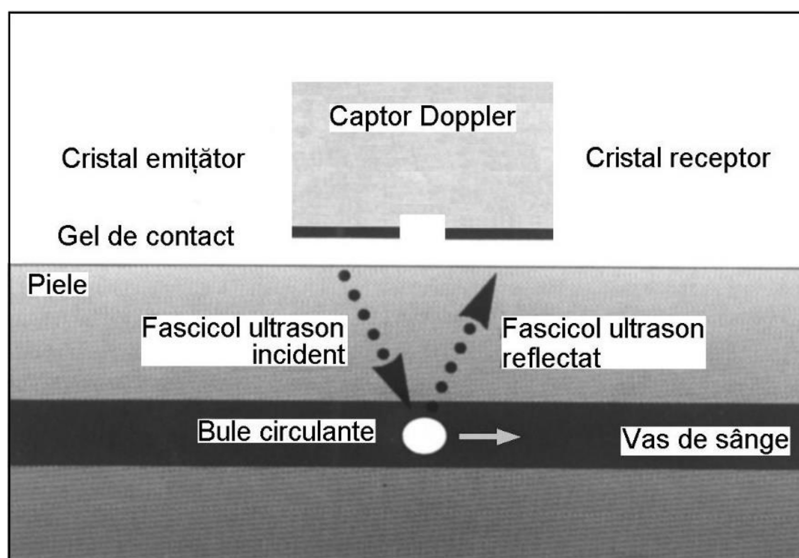


Figura 3.22 Schema de principiu a funcționării aparatului Doppler pentru detecția de bule în circuitul sanguin

Detecția de bule din curgerea bifazică pe timpul decompresiei după scufundările la adâncimile de 200 m și 300 m, s-a executat de două ori pe zi (dimineața și seara), în repaus și după efort (2...3 genoflexiuni lente). Evoluția cantitativă a bulelor circulante din sânge s-a făcut în 4 grade, funcție de numărul de bule pe fiecare sistolă. Aproape toți scafandrii au avut unul sau două grade de bule circulante, dar numai în condiții de efort. Un singur scafandru a suferit un accident de decompresie ce a necesitat o recompresie terapeutică.



Figura 3.23 Laboratorul Hiperbar din Duke University Medical Center

Pentru o comparare între tabela elaborată de specialiștii români și o tabelă americană se exemplifică profilul decompresiilor după scufundări executate la aproximativ aceeași adâncime și cu caracteristici similare. Este vorba despre scufundarea ATLANTIS I efectuată la Duke University Medical Center, Durham (figura 3.23) și scufundarea PONTUS IV efectuată la Laboratorul Hiperbar din Constanța. Profilele celor două decompresii sunt prezentate în figura 3.24.

Durata staționării la presiunea corespunzătoare adâncimii de 460 m, în scufundarea ATLANTIS I, a fost de 4 zile, fără alte variații de presiune. În cazul scufundării PONTUS IV, durata staționării la presiunea corespunzătoare adâncimii de 447 m a fost de 6 zile, timp în care au fost efectuate 3 intervenții sub apă la adâncimile de 450 m, 480 m și 500 m. În acest ultim experiment, decompresia a început după 24 ore de la ultima intervenție sub apă a scafandrilor.

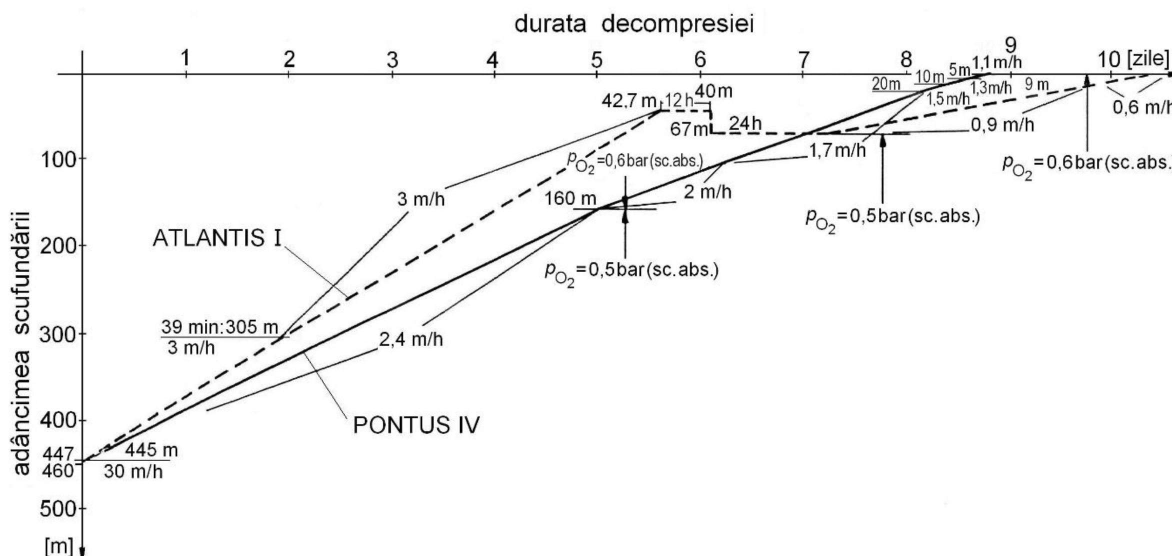


Figura 3.24 Comparație între decompresiile executate în experiențele ATLANTIS I (Duke University Medical Center, Durham, S.U.A.) și PONTUS IV (Laboratorul Hiperbar din Constanța)

Din analiza comparativă a celor două decompresii, se remarcă unele asemănări și deosebiri:

- adâncimea de la care a pornit decompresia în experimentul ATLANTIS I a fost de 460 m, iar în experimentul PONTUS IV a fost de 447 m; diferența dintre modul de lansare a decompresiei a constatat în faptul că în experimentul ATLATIS I aceasta a început cu un salt de 15 m cu viteza de 30 m/h; decompresia în experimentul PONTUS IV a început fără salt;
- amestecul respirator utilizat a fost amestec HELIOX cu 5% azot în experimentul ATLANTIS I și cu 4% azot în experimentul PONTUS IV. Presiunea parțială a oxigenului la decompresie a fost $p_{O_2} =$0,5 bar (sc. abs.) [$p_{O_2} =$500 mbar (sc. abs.)] până la adâncimea de 67 m pentru experimentul ATLANTIS I și până la adâncimea de 160 m pentru experimentul PONTUS IV, după care amestecul respirator a fost îmbogățit în oxigen, până la presiunea parțială a oxigenului $p_{O_2} =$ 0,6 bar (sc. abs.) [$p_{O_2} =$600 mbar (sc. abs.)];
- vitezele de decompresie în experimentul ATLANTIS I au fost mai ridicate în prima parte a decompresiei (3 m/h) și mai mici după adâncimea de 67 m (0,9...0,6 m/h); în timp ce în experimentul PONTUS IV variația vitezelor a fost în limite mai restrânse (2,4...1,1 m/h);
- pe timpul decompresiei, calculată după metoda specialiștilor americani, a avut loc un accident de decompresie la adâncimea de

42,7 m ce a necesitat un palier de 12 ore; continuarea decompresiei a eșuat fiind nevoie să se execute o recompresie pentru tratarea accidentatului, de la 40 m la 67 m adâncime, urmată de o staționare de 24 ore, ca apoi decompresia să fie reluată cu viteze mai mici și cu o presiune parțială a oxigenului crescută [p_{O_2} =0,6 bar (sc. abs.) = 600 mbar (sc. abs.)]; de altfel, în următoarele experimente efectuate de specialiștii americani, deși au redus vitezele de decompresie, au avut loc, totuși, accidente destul de grave. În experimentul ATLANTIS II vitezele de decompresie au fost în limitele 2,5 m/h la 0,6 m/h, dar decompresia a început de la adâncimea de 650 m, înregistrându-se două accidente, unul la 466 m și altul la 45 m adâncime; în experimentul ATLANTIS III, efectuat la adâncimea de 686 m, vitezele de decompresie au fost mai mici, variind între 1,2 m/h și 0,5 m/h, înregistrându-se un accident de decompresie la adâncimea de 526 m; decompresia calculată de specialiștii români a fost continuă și sigură;

- durata totală a decompresiei după experimentul PONTUS IV a fost cu aproximativ 40 ore mai mică decât durata decompresiei după experimentul ATLANTIS I.

Din analiza celor două decompresii (figura 3.24), se desprinde faptul că metoda de calcul elaborată de specialiștii români este mai bună. Schimbarea presiunii parțiale a oxigenului la adâncimea de 160 m (mai repede decât în metoda americană) creează posibilitatea menținerii unei viteze de decompresie mai ridicate și facilitează eliminarea gazului inert din țesuturi, fără afectarea aparatului respirator (efectul Lorrain-Smith). Cele patru scufundări însumând 16 decompresii, executate după scufundări la peste 300 m adâncime în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța, au demonstrat valabilitatea modelului matematic utilizat în calcul. A fost înregistrat un singur accident de decompresie, ce a necesitat recompresie, de altfel minor, ceea ce a însemnat o incidență a accidentelor de 6,25%.

4

MODELE MATEMATICE PENTRU DESCRIEREA PROCESELOR HIPERBARE AFERENTE SCUFUNDĂRILOR DE SISTEM, DE MARE ADÂNCIME

În acest capitol, sunt prezentate două modele matematice, originale, propuse și elaborate de autorii acestei cărți, cu ajutorul cărora pot fi descrise, cât mai fidel posibil, procesele hiperbare specifice celor două faze importante ale unei scufundări de sistem, de mare adâncime, și anume fazele de compresie a scafandrilor (presurizare a barocamerei) și de decompresie a scafandrilor (depresurizare a barocamerei), faze ce au loc în cazul oricărei misiuni de scufundare de sistem.

În deschiderea acestui capitol, se prezintă câteva elemente generale privind compresia și decompresia scafandrilor în cazul scufundărilor de sistem.

În continuare, este prezentat un prim model matematic, **MMSS-BN**, pentru o scufundare de sistem la adâncimea de 180 m, caracterizată prin lipsa vidării barocamerei și prin asigurarea unei presiuni parțiale a oxigenului la decompresie de 600 mbar (abs.).

Cel de-al doilea model matematic, **MMSS-BV**, elaborat și prezentat în cadrul acestui capitol, se referă la o scufundare de sistem la adâncimea de 180 m, caracterizată prin vidarea barocamerei și prin asigurarea unei presiuni parțiale a oxigenului la decompresie de 650 mbar (abs.). Acest model matematic a fost validat prin programul de scufundare reală testat în cadrul Laboratorului Hiperbar din Centrul de Scafandri Constanța.

La elaborarea celor două modele matematice, **MMSS-BN (**Model Matematic pentru Scufundare de Sistem-cu Barocameră Nevidată inițial**)** și **MMSS-BV** (Model Matematic pentru Scufundare de Sistem – cu Barocameră Vidată inițial), s-a ținut cont de următoarele ipoteze simplificatoare:

- se neglijează participația volumică a dioxidului de carbon din amestecul de gaze din barocameră datorită valorilor foarte scăzute ale concentrației de CO_2 din amestec prin existența unui absorber performant de CO_2;
- se neglijează participația volumică a vaporilor de apă din amestecul de gaze din barocameră datorită valorilor foarte scăzute ale concentrației de vapori din amestec prin existența unui sistem foarte bun de reținere a vaporilor din barocameră;
- modelele matematice nu cuprind nici consumurile de oxigen și nici completările continue cu oxigen pentru completarea oxigenului consumat de scafandrii din barocameră.

4.1 ELEMENTE GENERALE PRIVIND COMPRESIA ȘI DECOMPRESIA SCAFANDRILOR ÎN CAZUL SCUFUNDĂRII DE SISTEM

Indiferent de procedeul de scufundare, unitară sau în saturație, etapele principale ce compun o misiune subacvatică sunt:

- compresia;
- staționarea la adâncimea de lucru;
- decompresia.

Fiecare dintre aceste etape sunt caracterizate prin limite de timp, adâncimi și viteze de scufundare/revenire la presiunea atmosferică, toate aceste mărimi fiind în legătură. Relația dintre acestea este corelată preliminar începerii scufundării și este prezentată în tabele de scufundare specializate, prin care se indică modul în care trebuie să se desfășoare fiecare etapă, astfel încât procesele ce au loc în organismul uman pe durata scufundării să nu afecteze sănătatea scafandrilor.

4.1.1 Compresia scafandrilor

Prima etapă a oricărei incursiuni subacvatice este cea de compresie. Aceasta este descrisă, din punctul de vedere al hidraulicii hiperbare, de totalitatea proceselor ce au loc în intervalul de presiuni cuprinse între presiunea atmosferică și presiunea corespunzătoare adâncimii de lucru.

Compresia scafandrilor se realizează fie prin coborârea scafandrilor către adâncimea de lucru în cazul scufundărilor unitare sau cu alimentare de la suprafață a scafandrilor, fie prin presurizarea barocamerei până la „nivelul de viață" în cazul scufundărilor de sistem unitare sau în saturație.

În funcție de procedeul de scufundare și de modul în care acesta este executat (autonom sau de sistem), etapa compresiei este tratată în mod diferit.

În literatura de specialitate, se precizează că, în cazul scufundărilor unitare, timpul necesar compresiei se adaugă la durata totală a scufundării și se ia în calcul la stabilirea decompresiei, motiv pentru care, în cazul acestor scufundări, viteza de coborâre la adâncimea de lucru trebuie să fie cât mai mare, fiind un factor de care trebuie să se țină cont la planificarea scufundării.

În cadrul materialului citat anterior, se precizează că, în cazul scufundărilor unitare autonome, ca urmare a limitării duratei în care scafandrii sunt în imersie, viteza de coborâre trebuie să fie mai mare. Valorile vitezei de coborâre pot atinge 30 m/minut, valoare ce poate fi atinsă și în cazul scufundărilor unitare de sistem până la adâncimi de 100 m. Pentru scufundări unitare de sistem la adâncimi cuprinse între 100 m și 180 m valoarea vitezei de coborâre se reduce până la 15 – 20 m/minut.

Scufundările în saturație se caracterizează prin viteze variabile ale fazei de compresie, funcție de adâncime și de amestecul respirator folosit. Cercetările efectuate în cadrul Laboratorului Hiperbar din Centrul de Scafandri Constanța

al Forțelor Navale Române pentru acest procedeu de scufundare și folosind amestec respirator HELIOX, au condus la valorile vitezei de compresie și ale timpilor de palier prezentate în tabelul 4.1.

Tabelul 4.1 Viteza de compresie și timpii de palier pentru scufundări în saturație cu amestec HELIOX conform studiilor efectuate în cadrul Centrului de Scafandri din Constanța

Intervalul de adâncimi [m]	**Viteza de compresie [m/min]**	**Palier [min]**
0 - 100	10	15
100 - 240	4	30
240 - 300	2	30
300 - 400	0,5	60
400 - 500	0,25	

Pentru exemplificare, în figura 4.1 se prezintă grafic profilul compresiei pentru cele patru scufundări din seria „Pontus” efectuată în cadrul Centrului de Scafandri Constanța al Forțelor Navale Române.

4.1.2 Decompresia scafandrilor

Decompresia reprezintă etapa de revenire a scafandrilor la presiunea atmosferică.

Decompresia scafandrilor se realizează fie prin urcarea scafandrilor către suprafață în cazul scufundărilor unitare sau cu alimentare de la suprafață a scafandrilor, fie prin depresurizarea barocamerei de la “nivelul de viață” până la presiunea atmosferică în cazul scufundărilor de sistem unitare sau în saturație.

Factorul determinant în modul cum se efectuează această etapă a scufundării este dictat de viteza cu care gazul inert dizolvat în organismul scafandrilor de-a lungul expunerii la presiuni ridicate este eliminat.

Odată cu revenirea la suprafață, deci a scăderii presiunii, apar diferențe între valoarea presiunii parțiale a gazului inert din amestecul respirator și presiunea acestui gaz ce se află dizolvat în țesuturi, aceasta din urmă având valori mai mari. Acest proces trebuie controlat printr-o planificare inițială atentă a decompresiei.

În funcție de procedeul și de adâncimea de scufundare, în general, dar fără a fi o regulă, efectuarea decompresiei poate fi făcută după cum urmează:

- *în trepte*, cu paliere de decompresie, pentru scufundări autonome sau de sistem la adâncimi de până la 120 m;
- *continuu*, pentru scufundări unitare de sistem la adâncimi de peste 120 m și pentru scufundări în saturație.

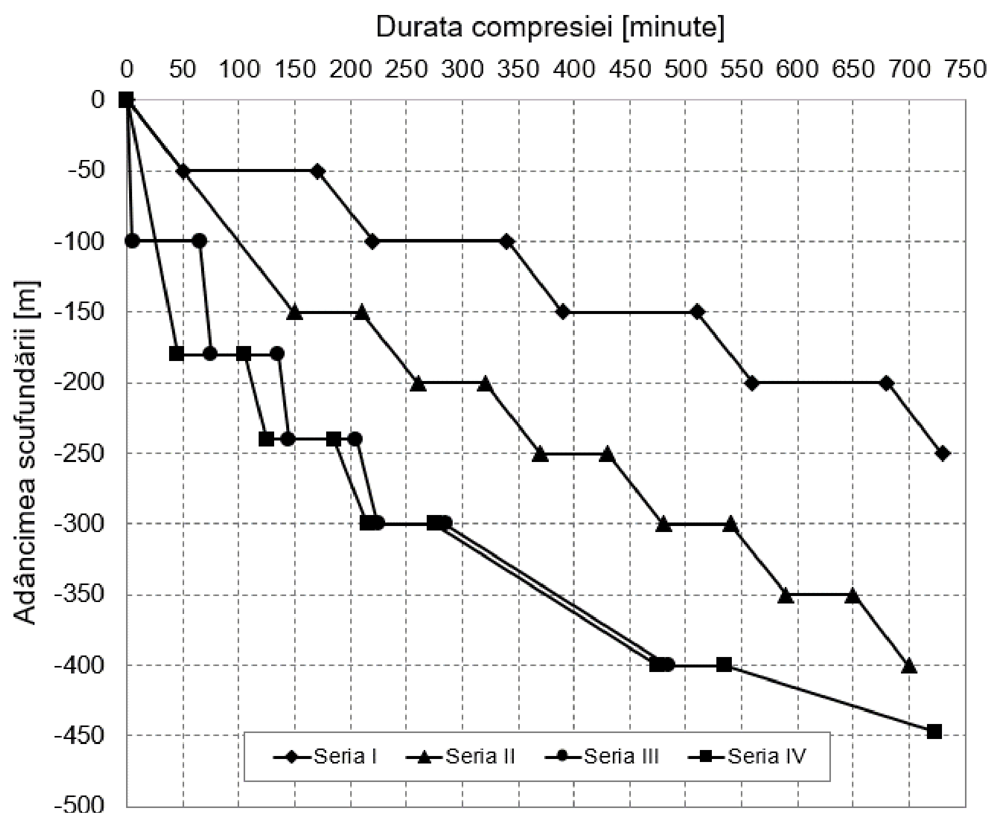


Figura 4.1 Profilul compresiei – seria de scufundări „Pontus” efectuate în cadrul Laboratorului Hiperbar din Centrul de Scafandri Constanța al Forțelor Navale Române

Având în vedere faptul că una dintre temele de studiu ale prezentei teze de doctorat s-a referit la conceperea și realizarea modelului matematic, analitic, pentru o scufundare de sistem, unitară, tip test, cu compresie rapidă, realizată la adâncimea maximă de 180 m, la care s-a folosit amestec respirator binar HELIOX 5/95, în continuare se va prezenta doar decompresia efectuată continuu. Pentru exemplificare, în figura 4.2 sunt prezentate profilele de decompresie efectuată continuu, corespunzătoare unor scufundări de mare adâncime folosind amestec respirator HELIOX, scufundări efectuate în cadrul Laboratorului Hiperbar al Centrului de Scafandri Constanța din cadrul Forțelor Navale Române.

Fenomenul de saturare a țesuturilor corpului uman, atunci când acesta este supus proceselor hiperbare, depinde pe de o parte de gazul inert ce intră în compoziția amestecului respirator, de condițiile de mediu de la adâncimea considerată, determinante pentru procesele hiperbare așa cum sunt presiunea și temperatura și, pe de altă parte de caracteristicile organismului uman.

Având în vedere aceste aspecte în stabilirea modului (a calculului) de efectuare al decompresiei în scopul creării tabelelor de decompresie trebuie să se țină cont de:

- procedeul de scufundare ales;
- gazul sau gazele inerte din compoziția amestecului respirator;

- presiune;
- timpul de expunere la o anumită valoare a presiunii.

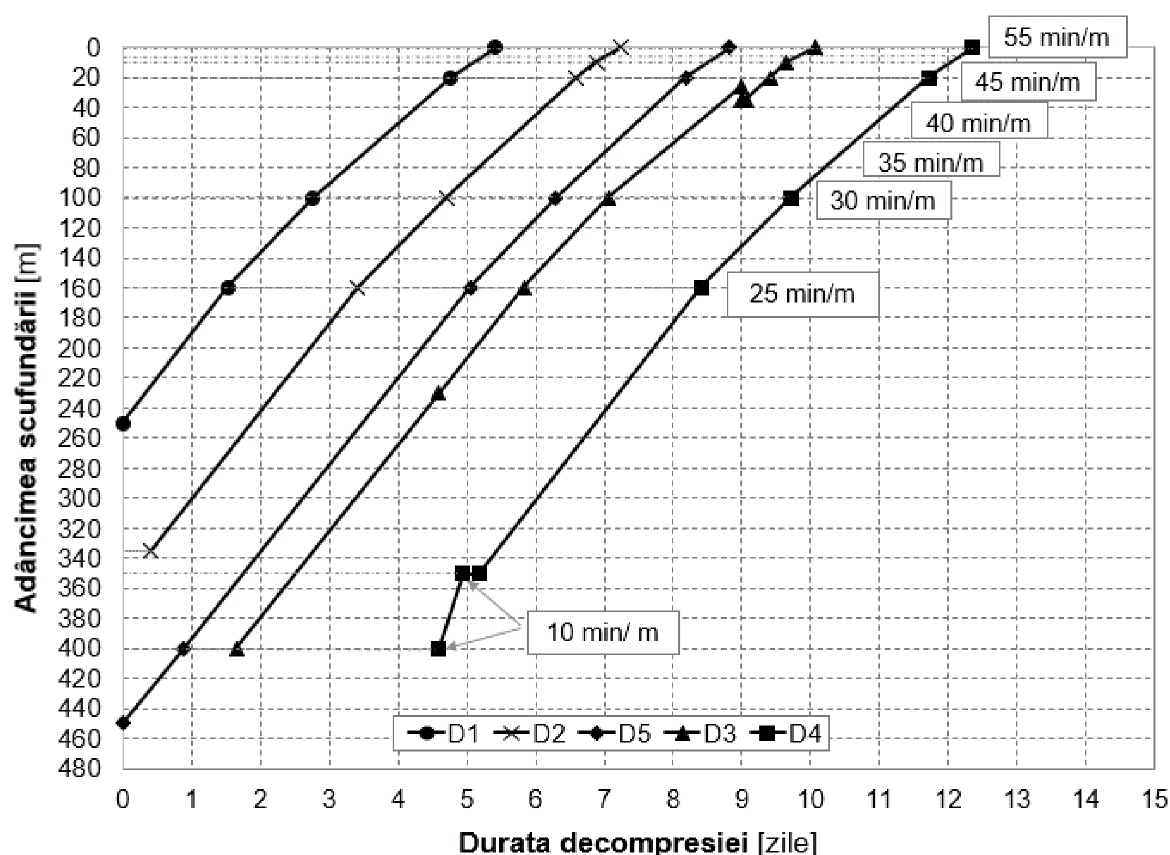


Figura 4.2 Profile de decompresie continuă – serie de scufundări efectuate în cadrul Laboratorului Hiperbar din Centrul de Scafandrii Constanța al Forțelor Navale Române

4.2 MODEL MATEMATIC PENTRU DESCRIEREA PROCESELOR HIPERBARE AFERENTE UNEI SCUFUNDĂRI DE SISTEM, UNITARE, LA ADÂNCIMEA DE 180 m, FĂRĂ VIDAREA INIȚIALĂ A BAROCAMEREI (MMSS-BN)

În cadrul acestui paragraf, se prezintă un prim model matematic original, privind descrierea proceselor hiperbare ce au loc în cadrul unei scufundări de sistem, unitare, la adâncimea de 180 m, la care compresia scafandrilor, respectiv presurizarea barocamerei, se realizează prin presurizare cu amestec gazos binar HELIOX 5/95 (cu concentrația de 5% pentru oxigen, și 95% pentru heliu) peste aerul aflat inițial în barocameră, la presiunea atmosferică. Această scufundare simulată este o scufundare de tip test și este obligatorie pentru toți scafandrii de mare adâncime și, în timpul acesteia, se urmărește comportamentul și adaptarea scafandrilor la Sindromul Nervos al Înaltelor Presiuni (SNIP).

Acest tip de scufundare, cu barocameră nevidată inițial, se practică în mod curent în cadrul testelor de mare adâncime, fiind ușor diferită de planul de scufundare la 180 m care pretinde vidarea inițială a barocamerei, adică eliminarea aerului existent în barocameră, la presiunea atmosferică.

De asemenea, la modelarea matematică a scufundării test la 180 m, s-a impus ca, pe timpul decompresiei, presiunea parțială a oxigenului să fie constantă și egală cu 0,6 bara adică 600 mbar (abs.).

În continuare, acest model matematic se va numi, pe scurt, Model Matematic pentru Scufundare de Sistem cu Barocameră Nevidată (MMSS-BN).

MMSS-BN, ca și scufundarea reală, cuprinde două faze și anume (schema 4.1):

- *Faza de Compresie a scafandrilor*, adică de presurizare a barocamerei, pentru cazul Barocamerei Nevidate (**FC-BN**);
- *Faza de Decompresie a scafandrilor*, adică de depresurizare a barocamerei, pentru cazul Barocamerei Nevidate (**FD-BN**).

Schema 4.1 Schema modelului matematic al unei Scufundări de Sistem pentru cazul cu Barocameră nevidată (MMSS-BN), cu fazele și grupurile de etape de calcul aferente

MMSS-BN			
FC-BN	**FD-BN**		
GECU-BN	GED1-BN	GED2-BN	EFD-BN
18 etape	9 etape	16 etape	1 etapă

4.2.1. Faza compresiei scafandrilor pentru modelul matematic „cu barocameră nevidată"

Faza de Compresie a Scafandrilor, pentru cazul Barocamerei Nevidate (FC-BN), este alcătuită dintr-un **Grup de Etape de Compresie Unic (GECU-BN)**. Acest grup de etape este alcătuit din 18 etape de calcul (C_1 – C_2, C_2 – C_3,..., C_{18} – C_{19}), care realizează legătura între cele 19 stări aparținând grupului de etape GECU-BN (C_1, C_2,...C_{19}).

Toate cele 18 etape de calcul ale GECU-BN se referă la compresia scafandrilor prin presurizarea barocamerei cu amestec binar de gaze HELIOX 5/95 (5% Ox și 95% He), peste aerul aflat inițial, la presiunea atmosferică, în barocameră (la adâncimea echivalentă de 0 m), rezultând, în barocameră, un amestec ternar de gaze (Ox, Ni, He).

Acest grup de etape, unic, (GECU-BN), care coincide cu faza de compresie (FC-BN), are ca stare inițială starea C_1 caracterizată prin presiunea totală p_{C1am} = 1 bara, prin adâncimea echivalentă H_{C1} = 0 m și prin presiunea parțială a oxigenului $p_{C1,Ox}$ = 0,2092 bara = 209,2 mbar (abs.) și ca stare finală C_{19} caracterizată prin p_{C19am} =1 9 bara, HC19 = 180 m și $p_{C19,Ox}$ = 1,1099 bara = 1109,9 mbar (abs.), numită și Nivel de Viață (NV), la care scafandrii staționează și efectuează diferite teste specifice urmăririi efectelor Sindromului Nervos al Înaltelor Presiuni (SNIP).

Pentru fiecare dintre cele 19 stări caracteristice GECU-BN, respectiv FC-BN se determină, presiunile parțiale, participațiile masice și participațiile volumice ale celor trei componente ale amestecului gazos ternar (Ox, Ni, He), precum și presiunea totală a amestecului ternar și, corespunzător, adâncimea echivalentă presiunii amestecului din barocameră.,

Pentru determinarea relațiilor de calcul a acestor mărimi caracteristice celor 19 stări ale amestecului de gaze din barocameră în timpul FC-BN identică cu GECU-BN, s-a realizat o procedură care ține cont de următoarele:

- se înlocuiește, imaginar, aerul (21% Ox și 79% Ni) existent în barocameră la presiunea atmosferică (adâncime de 0 m), cu amestec HELIOX 5/95 (5% Ox și 95% He), tot la presiunea atmosferică (1 bara);
- se presurizează barocamera, tot imaginar, cu amestec HELIOX 5/95 peste amestecul HELIOX 5/95 aflat la presiune atmosferică (1 bara) în barocameră până la o presiune curentă a amestecului p, notată ulterior cu p_{am};
- se determină, corespunzător presiunii p_{am} masele de Oxigen și de Heliu corespunzător masei de amestec binar HELIOX cu care s-a făcut presurizarea de la presiunea atmosferică, la presiunea curentă, p_{am};
- se înlocuiește, apoi, masa de HELIOX aflată la presiunea atmosferică, cu aer la presiunea atmosferică, ajungându-se la situația reală;
- se determină masele de Oxigen și Azot din aerul aflat în barocameră la presiunea atmosferică (1 bara);
- se adună masele de oxigen și azot din aerul aflat la presiunea atmosferică cu masele de oxigen și heliu corespunzătoare masei de HELIOX cu care s-a presurizat barocamera, de la presiunea atmosferică (1 bara) la presiunea curentă p_{am}; astfel, masa de oxigen provine atât din aerul aflat inițial în barocameră cât și din amestecul de HELIOX cu care s-a făcut presurizarea barocamerei, peste presiunea atmosferică, până la presiunea curentă p_{am};
- se determină relațiile de calcul, la presiunea curentă p_{am}, pentru participațiile masice ale componentelor, apoi pentru participațiile volumice ale acestora și, în final, pentru presiunile parțiale ale componentelor amestecului ternar (Ox, Ni, He).

Pe baza relațiilor stabilite în continuare, pentru fiecare din cele 19 stări aferente fazei de compresie FC-BN, se determină presiunile parțiale, participațiile masice și participațiile volumice.

În continuare s-a trecut la deducerea relațiilor de calcul pentru participațiile masice, participațiile volumice și presiunile parțiale ale celor 3 componente (He, Ni, Ox), funcție de p_{am}, rezultând relațiile de calcul finale prezentate în cele ce urmează:

$$M^{p}_{HeOx95/5} = \rho^{p}_{HeOx95/5} \cdot V$$

$$\rho^{p}_{HeOx95/5} = \frac{p^{p}_{HeOx}}{R_{HeOx95/5} \cdot T} = \frac{p}{1540 \cdot 293,16} = \frac{p}{451466,4}$$

$$M^{p}_{HeOx95/5} = \frac{pV}{451466,4}$$

$$M^{0,05}_{Ox} = m^{0,05}_{Ox} \cdot M^{p}_{HeOx95/5} = 0,296 \cdot \frac{pV}{451466,4} = \frac{pV}{1525224,3}$$

$$M^{0,95}_{He} = m^{0,95}_{He} \cdot M^{p}_{HeOx95/5} = 0,704 \cdot \frac{pV}{451466,4} = \frac{pV}{641287,5}$$

Masa de HeOx 5/59, de He 95% și de Ox 5%, adăugate pentru a crește presiunea amestecului HeOx de la presiunea de 1 bara la *p*, notată ulterior cu p_{am}.

$$M^{1-p}_{HeOx95/5} = M^{p}_{HeOx95/5} - M^{1}_{HeOx95/5} = \frac{pV}{451466,4} - 0,2215V$$

$$M^{1-p}_{HeOx95/5} = \left(\frac{p}{451466,4} - 0,2215\right)V$$

$$M^{1-p}_{He} = M^{p}_{He95} - M^{1}_{He95} = \frac{pV}{641287,5} - 0,155936V$$

$$M^{1-p}_{He95} = \left(\frac{p}{641287,5} - 0,155936\right)V$$

$$M^{1-p}_{Ox5} = M^{p}_{Ox5} - M^{1}_{Ox5} = \frac{pV}{1525224,3} - 0,065564V$$

$$M^{1-p}_{Ox5} = \left(\frac{p}{1525224,3} - 0,065564\right)V$$

Aceste mase se suprapun peste masele de aer, Ni și Ox

$$M^{p}_{TRIMIX} = M^{1}_{aer} + M^{1-p}_{HeOx95/5} = 1,1844V = 0,2215V + 2,2150045 \cdot 10^{-6}\, pV$$

$$M^{p}_{TRIMIX} = 0,9629V + 0,2150045 \cdot 10^{-6}\, pV$$

$$M_{He}^{p} = M_{He95}^{1-p} = \left(1,559363 \cdot 10^{-6} p - 0,155936\right)V$$

$$M_{Ni}^{1} = 0,9085532V$$

$$M_{Ox}^{p} = M_{Ox5}^{1-p} + M_{Ox21}^{1} = \left(0,65564127 \cdot 10^{-6} p - 0,065564V + 0,2758467V\right)$$

$$M_{Ox}^{p} = 0,65564127 \cdot 10^{-6} pV + 0,210282 \div V$$

Densitatea TRIMIX la presiunea *p*:

$$\rho_{TRIMIX}^{p} = \frac{M_{TRIMIX}^{p}}{V}$$

$$\rho_{TRIMIX}^{p} = \frac{\left(0,9629 + 2,2150045 \cdot 10^{-6} \cdot p\right)V}{V}$$

$$\rho_{TRIMIX}^{p} = 0,9629 + 2,2150045 \cdot 10^{-6} \cdot p$$

Participații masice ale componentelor gazoase din TRIMIX la presiunea *p*:

$$m_{He}^{p} = \frac{M_{He}^{p}}{M_{TRIMIX}^{p}} = \frac{\left(1,559363 \cdot 10^{-6} \cdot p - 0,155936\right) \cdot V}{\left(0,9629 + 2,2150045 \cdot 10^{-6} \cdot p\right) \cdot V}$$

$$m_{Ni}^{p} = \frac{M_{Ni}^{p}}{M_{TRIMIX}^{p}} = \frac{0,9085532 \cdot V}{\left(0,9629 + 2,2150045 \cdot 10^{-6} \cdot p\right) \cdot V}$$

$$m_{Ox}^{p} = \frac{M_{Ox}^{p}}{M_{TRIMIX}^{p}} = \frac{\left(0,65564127 \cdot 10^{-6} \cdot p + 0,210282\right) \cdot V}{\left(0,9629 + 2,2150045 \cdot 10^{-6} \cdot p\right) \cdot V}$$

Pentru cazul particular în care *p* = 1 bara, ($1 \cdot 10^{5}$ N/m^2 (abs.)), $m_{He}^{p} = 0,$ iar M_{TRIMIX}^{1} devine M_{aer}^{1}.

Participații volumice ale componentelor gazoase din amestecul TRIMIX la presiunea *p*:

$$r_{Ox}^{p} = m_{Ox}^{p} \cdot \frac{\mathcal{M}_{TRIMIX}^{p}}{\mathcal{M}_{Ox}} =$$

$$= \frac{0,65564127 \cdot 10^{-6} \cdot p + 0,210282}{0,9629 + 2,2150045 \cdot 10^{-6} \cdot p} \cdot \frac{\left(0,9629 + 2,2150045 \cdot 10^{-6} \cdot p\right) \cdot 8314,3}{3612,3824 \cdot 10^{-6} \cdot p + 0,56512} \cdot \frac{1}{31,999} =$$

$$= \frac{0,65564127 \cdot 10^{-6} \cdot p + 0,210282}{3412,3824 \cdot 10^{-6} \cdot p + 0,5672} \cdot \frac{8314,3}{31,999}$$

$$r_{Ox}^{p} = \frac{170,35525 \cdot 10^{-6} \cdot p + 54,637571}{3412,3824 \cdot 10^{-6} \cdot p + 0,56512}$$

$$r_{Ni}^{p} = m_{Ni}^{p} \cdot \frac{\mathcal{M}_{TRIMIX}^{p}}{\mathcal{M}_{Ni}} = \frac{0,9085532}{3412,3824 \cdot 10^{-6} \cdot p + 0,2512} \cdot \frac{8314,3}{28,013}$$

$$r_{Ni}^{p} = \frac{269,65994}{3412,3824 \cdot 10^{-6} \cdot p + 0,56512}$$

$$r_{He}^{p} = m_{He}^{p} \cdot \frac{\mathcal{M}_{TRIMIX}^{p}}{\mathcal{M}_{He}} = \frac{1,559363 \cdot 10^{-6} \cdot p - 0,1559363}{3412,3824 \cdot 10^{-6} \cdot p + 0,56512} \cdot \frac{8314,3}{4,002}$$

$$r_{He}^{p} = \frac{3239,6331 \cdot 10^{-6} \cdot p - 323,96331}{3412,3824 \cdot 10^{-6} \cdot p + 0,56512}$$

Când $p = 1 bara = 10^{5} N/m^{2} \left(abs.\right) \Rightarrow r_{He}^{p} = 0$

în care: p_{Ox} este presiunea parțială a oxigenului [bara], p_{Ni} - presiunea parțială a azotului [bara], p_{He} - presiunea parțială a heliului [bara]; m_{Ox} - participația masică a oxigenului [-], m_{Ni} - participația masică a azotului [-], m_{He} - participația masică a heliului [-], r_{Ox} - participația volumică a oxigenului [-], r_{Ni} - participația volumică a azotului [-], r_{He} - participația volumică a heliului [-], $\mathcal{M}_{Ox}$ - masa molară a oxigenului [kg/kmol], $\mathcal{M}_{Ni}$ - masa molară a azotului [kg/kmol], $\mathcal{M}_{He}$ - masa molară a heliului [kg/kmol], $\mathcal{M}_{TRIMIX}$ - masa molară a amestecului ternar TRIMIX [kg/kmol], V - volumul amestecului [m^{3}], ρ - densitatea [kg/m^{3}].

Corespunzător grupului de etape GECU-BN, în tabelele 4.2, 4.3,...4.20 sunt prezentate valorile presiunilor parțiale ($p_{Cn,Ox}$, $p_{Cn,Ni}$, $p_{Cn,He}$), participațiilor masice ($m_{Cn,Ox}$, $m_{Cn,Ni}$, $m_{Cn,He}$), participațiilor volumice ($r_{Cn,Ox}$, $r_{Cn,Ni}$, $r_{Cn,He}$) ale componentelor amestecului de gaze, presiunea amestecului din barocameră (p_{Cnam}) și adâncimea echivalentă (H_{Cn}) pentru cele n = 1, 2,...19 stări aferente fazei de compresie FC-BN identice cu grupul de etape GECU-BN.

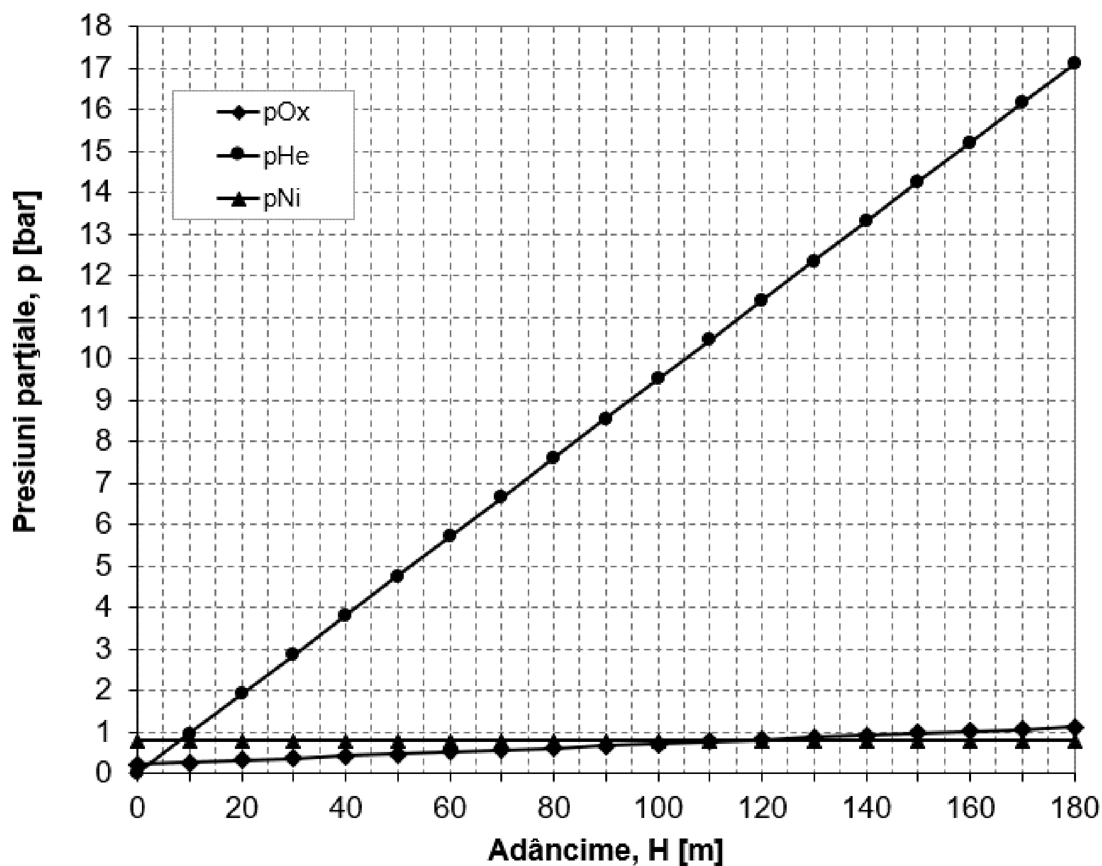


Figura 4.3 Variația presiunilor parțiale ale componentelor amestecului ternar din barocameră, cu adâncimea, în faza de compresie, FC-BN. Presurizare cu amestec HELIOX 5/95 peste AER

Variația presiunilor parțiale ale componentelor amestecului ternar cu adâncimea de scufundare, în faza de compresie FC-BN, obținute cu modelul matematic MMSS-BN și prezentate în tabelele 4.2, 4.3,....4.20, este reprezentată grafic în figura 4.3.

Tabelul 4.2 Starea C_1 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C1am} = 1 bara			
H_{C1} = 0 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{C1Ox} [bara]	p_{C1Ni} [bara]	p_{C1He} [bara]
C_1	0,2092	0,7899	0
Participația masică			
Stare	m_{C1Ox} [-]	m_{C1Ni} [-]	m_{C1He} [-]
C_1	0,2321	0,7671	0
Participația volumică			
Stare	r_{C1Ox} [-]	r_{C1Ni} [-]	r_{C1He} [-]
C_1	0,2092	0,7901	0

Tabelul 4.3 Starea C_2 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C2am} = 2 bara			
H_{C2}= 10 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{C2Ox} [bara]	p_{C2Ni} [bara]	p_{C2He} [bara]
C_2	0,2599	0,7899	0,9499
Participația masică			
Stare	m_{C2Ox} [-]	m_{C2Ni} [-]	m_{C2He} [-]
C_2	0,2422	0,6462	0,1109
Participația volumică			
Stare	r_{C2Ox} [-]	r_{C2Ni} [-]	r_{C2He} [-]
C_2	0,1298	0,3955	0,4751

Tabelul 4.4 Starea C_3 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C3am} = 3 bara			
H_{C3}= 20 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{C3Ox} [bara]	p_{C3Ni} [bara]	p_{C3He} [bara]
C_3	0,3099	0,7899	1,8998
Participația masică			
Stare	m_{C3Ox} [-]	m_{C3Ni} [-]	m_{C3He} [-]
C_3	0,2496	0,5582	0,1915
Participația volumică			
Stare	r_{C3Ox} [-]	r_{C3Ni} [-]	r_{C3He} [-]
C_3	0,1001	0,2636	0,6334

Tabelul 4.5 Starea C_4 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C4am} = 4 bara			
H_{C4}= 30 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{C4Ox} [bara]	p_{C4Ni} [bara]	p_{C4He} [bara]
C_4	0,3599	0,7899	2,8499
Participația masică			
Stare	m_{C4Ox} [-]	m_{C4Ni} [-]	m_{C4He} [-]
C_4	0,2552	0,4914	0,2529
Participația volumică			
Stare	r_{C4Ox} [-]	r_{C4Ni} [-]	r_{C4He} [-]
C_4	0,0879	0,1978	0,7125

Tabelul 4.6 Starea C_5 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C5am} = 5 bara			
H_{C5} = 40 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{C5Ox} [bara]	p_{C5Ni} [bara]	p_{C5He} [bara]
C_5	0,4099	0,7899	3,7999
Participația masică			
Stare	m_{C5Ox} [-]	m_{C5Ni} [-]	m_{C5He} [-]
C_5	0,2596	0,4388	0,3011
Participația volumică			
Stare	r_{C5Ox} [-]	r_{C5Ni} [-]	r_{C5He} [-]
C_5	0,0805	0,1582	0,7602

Tabelul 4.7 Starea C_6 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C6am} = 6 bara			
H_{C6}= 50 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{C6Ox} [bara]	p_{C6Ni} [bara]	p_{C6He} [bara]
C_6	0,4599	0,7899	4,7498
Participația masică			
Stare	m_{C6Ox} [-]	m_{C6Ni} [-]	m_{C6He} [-]
C_6	0,2631	0,3964	0,3400
Participația volumică			
Stare	r_{C6Ox} [-]	r_{C6Ni} [-]	r_{C6He} [-]
C_6	0,0756	0,1318	0,7916

Tabelul 4.8 Starea C_7 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C7am} = 7 bara			
H_{C7}= 60 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{C7Ox} [bara]	p_{C7Ni} [bara]	p_{C7He} [bara]
C_7	0,5099	0,7899	5,6998
Participația masică			
Stare	m_{C7Ox} [-]	m_{C7Ni} [-]	m_{C7He} [-]
C_7	0,2661	0,3615	0,3721
Participația volumică			
Stare	r_{C7Ox} [-]	r_{C7Ni} [-]	r_{C7He} [-]
C_7	0,0720	0,1130	0,8143

Tabelul 4.9 Starea C_8 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C8am} = 8 bara			
H_{C8}= 70 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{C8Ox} [bara]	p_{C8Ni} [bara]	p_{C8He} [bara]
C_8	0,5599	0,7899	6,6498
Participația masică			
Stare	m_{C8Ox} [-]	m_{C8Ni} [-]	m_{C8He} [-]
C_8	0,2685	0,3322	0,3989
Participația volumică			
Stare	r_{C8Ox} [-]	r_{C8Ni} [-]	r_{C8He} [-]
C_8	0,0693	0,0989	0,8311

Tabelul 4.10 Starea C_9 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C9am} = 9 bara			
H_{C9} = 80 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{C9Ox} [bara]	p_{C9Ni} [bara]	p_{C9He} [bara]
C_9	0,6099	0,7899	7,5998
Participația masică			
Stare	m_{C9Ox} [-]	m_{C9Ni} [-]	m_{C9He} [-]
C_9	0,2706	0,3073	0,4218
Participația volumică			
Stare	r_{C9Ox} [-]	r_{C9Ni} [-]	r_{C9He} [-]
C_9	0,0672	0,0879	0,8445

Tabelul 4.11 Starea C_{10} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C10am} = 10 bara			
H_{C10}= 90 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{C10Ox} [bara]	p_{C10Ni} [bara]	p_{C10He} [bara]
C_{10}	0,6599	0,7899	8,5498
Participația masică			
Stare	m_{C10Ox} [-]	m_{C10Ni} [-]	m_{C10He} [-]
C_{10}	0,2724	0,2856	0,4414
Participația volumică			
Stare	r_{C10Ox} [-]	r_{C10Ni} [-]	r_{C10He} [-]
C_{10}	0,0655	0,0790	0,8549

Tabelul 4.12 Starea C_{11} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C11am} = 11 bara			
H_{C11} = 100 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{C11Ox} [bara]	p_{C11Ni} [bara]	p_{C11He} [bara]
C_{11}	0,7099	0,7899	9,4997
Participația masică			
Stare	m_{C11Ox} [-]	m_{C11Ni} [-]	m_{C11He} [-]
C_{11}	0,2739	0,2673	0,4585
Participația volumică			
Stare	r_{C11Ox} [-]	r_{C11Ni} [-]	r_{C11He} [-]
C_{11}	0,0642	0,0719	0,8636

Tabelul 4.13 Starea C_{12} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C12am} = 12 bara			
H_{C12}= 110 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{C12Ox} [bara]	p_{C12Ni} [bara]	p_{C12He} [bara]
C_{12}	0,7599	0,7899	10,4497
Participația masică			
Stare	m_{C12Ox} [-]	m_{C12Ni} [-]	m_{C12He} [-]
C_{12}	0,2753	0,4735	0,2509
Participația volumică			
Stare	r_{C12Ox} [-]	r_{C12Ni} [-]	r_{C12He} [-]
C_{12}	0,0630	0,0659	0,8708

Tabelul 4.14 Starea C_{13} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C13am} = 13 bara			
H_{C13} = 120 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{C13Ox} [bara]	p_{C13Ni} [bara]	p_{C13He} [bara]
C_{13}	0,8099	0,7899	11,3997
Participația masică			
Stare	m_{C13Ox} [-]	m_{C13Ni} [-]	m_{C13He} [-]
C_{13}	0,2765	0,2364	0,4868
Participația volumică			
Stare	r_{C13Ox} [-]	r_{C13Ni} [-]	r_{C13He} [-]
C_{13}	0,0620	0,0608	0,8769

Tabelul 4.15 Starea C_{14} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C10am} = 14 bara			
H_{C10}= 130 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{C14Ox} [bara]	p_{C14Ni} [bara]	p_{C14He} [bara]
C_{14}	0,8599	0,7899	12,3497
Participația masică			
Stare	m_{C14Ox} [-]	m_{C14Ni} [-]	m_{C14He} [-]
C_{14}	0,2776	0,2235	0,4986
Participația volumică			
Stare	r_{C14Ox} [-]	r_{C14Ni} [-]	r_{C14He} [-]
C_{14}	0,0612	0,0565	0,8821

Tabelul 4.16 Starea C_{15} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C15am} = 15 bara			
H_{C15}= 140 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{C15Ox} [bara]	p_{C15Ni} [bara]	p_{C15He} [bara]
C_{15}	0,9099	0,7899	13,2997
Participația masică			
Stare	m_{C15Ox} [-]	m_{C15Ni} [-]	m_{C15He} [-]
C_{15}	0,2786	0,2119	0,5092
Participația volumică			
Stare	r_{C15Ox} [-]	r_{C15Ni} [-]	r_{C15He} [-]
C_{15}	0,0605	0,0527	0,8866

Tabelul 4.17 Starea C_{16} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C16am} = 16 bara			
H_{C16}= 150 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{C16Ox} [bara]	p_{C16Ni} [bara]	p_{C16He} [bara]
C_{16}	0,9599	0,7899	14,2496
Participația masică			
Stare	m_{C16Ox} [-]	m_{C16Ni} [-]	m_{C16He} [-]
C_{16}	0,2795	0,2016	0,5187
Participația volumică			
Stare	r_{C16Ox} [-]	r_{C16Ni} [-]	r_{C16He} [-]
C_{16}	0,0598	0,0494	0,8905

Tabelul 4.18 Starea C_{17} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C17am} = 17 bara			
H_{C17} = 160 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{C17Ox} [bara]	p_{C17Ni} [bara]	p_{C17He} [bara]
C_{17}	1,0099	0,7899	15,1996
Participația masică			
Stare	m_{C17Ox} [-]	m_{C17Ni} [-]	m_{C17He} [-]
C_{17}	0,2803	0,1921	0,5298
Participația volumică			
Stare	r_{C17Ox} [-]	r_{C17Ni} [-]	r_{C17He} [-]
C_{17}	0,0593	0,0465	0,8981

Tabelul 4.19 Starea C_{18} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C18am} = 18 bara			
H_{C18}= 170 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{C18Ox} [bara]	p_{C18Ni} [bara]	p_{C18He} [bara]
C_{18}	1,0599	0,7899	16,1496
Participația masică			
Stare	m_{C18Ox} [-]	m_{C18Ni} [-]	m_{C18He} [-]
C_{18}	0,2809	0,1835	0,5353
Participația volumică			
Stare	r_{C18Ox} [-]	r_{C18Ni} [-]	r_{C18He} [-]
C_{18}	0,0588	0,04339	0,8972

Tabelul 4.20 Starea C_{19} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C19am} = 19 bara			
H_{C19}= 180 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{C19Ox} [bara]	p_{C19Ni} [bara]	p_{C19He} [bara]
C_{19}	1,1099	0,7899	17,0996
Participația masică			
Stare	m_{C19Ox} [-]	m_{C19Ni} [-]	m_{C19He} [-]
C_{19}	0,2816	0,1757	0,5425
Participația volumică			
Stare	r_{C19Ox} [-]	r_{C19Ni} [-]	r_{C19He} [-]
C_{19}	0,0583	0,0416	0,8999

Variația participațiilor masice ale componentelor amestecului ternar cu adâncimea de scufundare, în faza de compresie FC-BN, obținute cu modelul matematic MMSS-BN și prezentate în tabelele 4.2, 4.3,....4.20, este reprezentată grafic în figura 4.4.

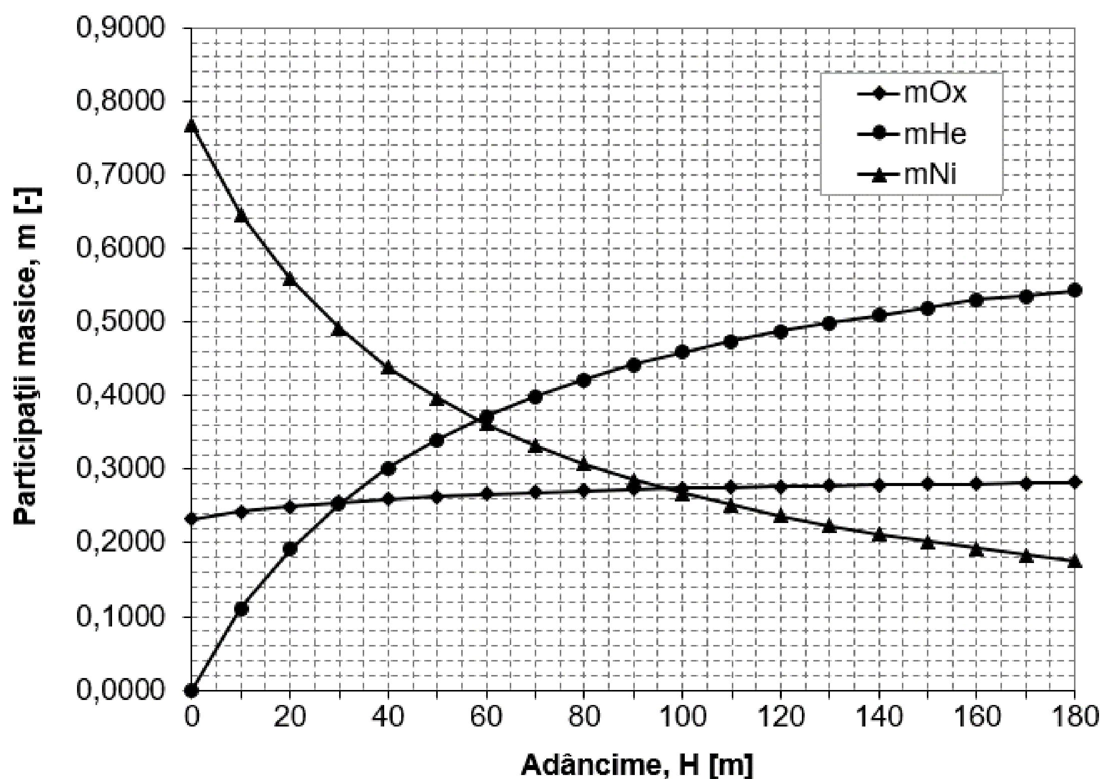


Figura 4.4 Variația participațiilor masice ale componentelor amestecului ternar din barocameră, cu adâncimea în faza de compresie, FC-BN. Presurizare cu amestec HELIOX 5/95 peste AER

Variația participațiilor volumice ale componentelor amestecului din barocameră cu adâncimea de scufundare, în faza de compresie FC-BN, obținute cu modelul matematic MMSS-BN și prezentate în tabelele 4.2, 4.3,....4.20 este reprezentată grafic în figura 4.5.

4.2.2 Faza decompresiei scafandrilor pentru modelul „cu barocameră nevidată“

Faza de Decompresie a scafandrilor, pentru cazul Barocamerei Nevidate (**FD-BN**), este alcătuită din Grupul de Etape de Decompresie 1 (**GED1-BN**), Grupul de Etape de Decompresie 2 (**GED2-BN**) și Etapa Finală de Decompresie (**EFD-BN**).

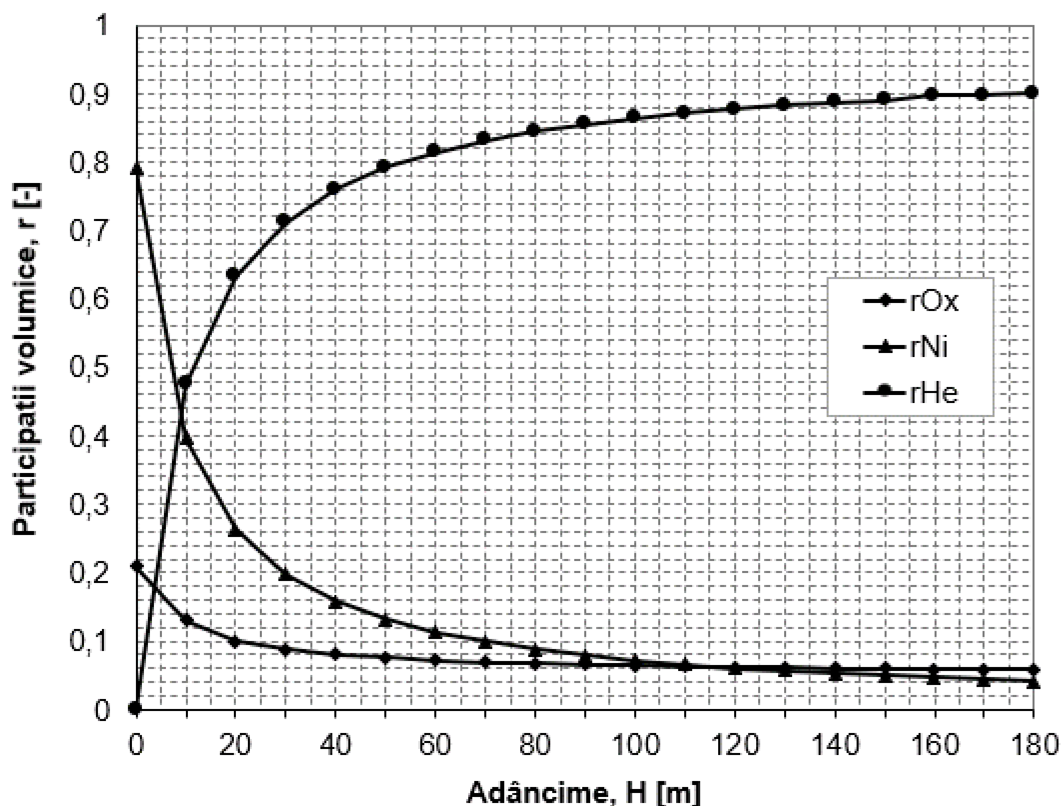


Figura 4.5 Variația participațiilor volumice ale componentelor amestecului ternar din barocameră, cu adâncimea în faza de compresie, FC-BN. Presurizare cu amestec HELIOX 5/95 peste AER

4.2.2.1 Grupul de etape de decompresie 1(GED1-BN)

Grupul de Etape de Decompresie 1 (GED1-BN) este alcătuit din 9 etape de calcul (D_1-D_2, D_2-D_3,...D_9-D_{10}), care realizează legătura între cele 10 stări aparținând grupului de etape GED1-BN (D_1, D_2,...D_{10}).

Toate cele 9 etape de calcul ale GED1-BN se referă la decompresia scafandrilor prin depresurizarea barocamerei, participațiile volumice ale celor trei componente ale amestecului de gaze (Ox, Ni, He) rămânând constante.

Acest prim grup de etape de decompresie (GED1-BN), are ca stare inițială starea D_1, identică cu starea finală C_{19} din faza de compresie (FC-BN), respectiv din grupul de etape unic de compresie (GECU -BN), numită și Nivel de Viață (NV), stare caracterizată prin $p_{D1,am} = p_{C19,am}$ = 19 bara, $H_{D1} = H_{C19}$ = 180 m și $p_{D1,Ox} = p_{C19,Ox}$ = 1,1099 bara = 1109,9 mbar (abs.) și ca stare finală D_{10} caracterizată prin $p_{D10,am}$ = 10,3 bara, H_{D10} = 93 m și $p_{D10,Ox}$ = 0,6004 bara = 600,4 mbar (abs.). La această ultimă stare D_{10} din GED1-BN se atinge, prin

decompresie, presiunea parțială a oxigenului dorită, de 600 mbar (abs.) ce va trebui menținută constantă în continuarea decompresiei.

Relațiile generale de calcul pentru mărimile caracteristice stărilor D_1, D_2,..., D_{10} aferente grupului de etape GED1-BN, sunt prezentate în cele ce urmează.

Presiunile parțiale ale celor trei componente din amestec:

$$p_{DnOx} = r_{DnOx} \cdot p_{Dnam}$$

$$p_{DnNi} = r_{DnNi} \cdot p_{Dnam}$$

$$p_{DnHe} = r_{DnHe} \cdot p_{Dnam}$$

Participațiile masice ale celor trei componente din amestec:

$$m_{DnOx} = \frac{r_{DnOx}}{\frac{R_{Ox}}{R_{am}}}$$

$$m_{DnNi} = \frac{r_{DnNi}}{\frac{R_{Ni}}{R_{am}}}$$

$$m_{DnHe} = \frac{r_{DnHe}}{\frac{R_{He}}{R_{am}}}$$

Participațiile volumice ale celor trei componente din amestec:

$$r_{DnOx} = m_{DnOx} \cdot \frac{\mathscr{M}_{am}}{\mathscr{M}_{Ox}}$$

$$r_{DnNi} = m_{DnNi} \cdot \frac{\mathscr{M}_{am}}{\mathscr{M}_{Ni}}$$

$$r_{DnHe} = m_{DnHe} \cdot \frac{\mathscr{M}_{am}}{\mathscr{M}_{He}}$$

în care: n este numărul stării aferente fazei respective, p_{Ox} - presiunea parțială a oxigenului [bara], p_{Ni} - presiunea parțială a azotului [bara], p_{He} - presiunea parțială a heliului [bara], p_{am} - presiunea parțială a amestecului gazos [bara], m_{Ox} - participația masică a oxigenului [-], m_{Ni} - participația masică a azotului [-], m_{He} - participația masică a heliului [-], r_{Ox} -participația volumică a oxigenului [-], r_{Ni} - participația volumică a azotului [-], r_{He} - participația volumică a heliului [-], $\mathscr{M}_{Ox}$ - masa molară a oxigenului [kg/kmol], $\mathscr{M}_{Ni}$ - masa molară a azotului

[kg/kmol], $\mathcal{M}_{He}$ - masa molară a heliului [kg/kmol], $\mathcal{M}_{am}$ - masa molară a amestecului [kg/kmol], ROxR_{Ox} - constanta caracteristică a oxigenului [J/kgK], RNiR_{Ni} - constanta caracteristică a azotului [J/kgK], RHeR_{He} - constanta caracteristică a heliului [J/kgK], RamR_{am} - constanta caracteristică a amestecului [J/kgK].

Corespunzător grupului de etape GED1-BN, în tabelele 4.21, 4.22,...4.30 sunt prezentate valorile presiunilor parțiale ($p_{Dn,Ox}$, $p_{Dn,Ni}$, $p_{Dn,He}$), participațiilor masice ($m_{Dn,Ox}$, $m_{Dn,Ni}$, $m_{Dn,He}$), participațiile volumice ($r_{Dn,Ox}$, $r_{Dn,Ni}$, $r_{Dn,He}$) ale componentelor amestecului de gaze, presiunii amestecului din barocameră ($p_{Dn,am}$) și adâncimii echivalente (H_{Dn}) pentru cele n = 1, 2,...10 stări aferente fazei de decompresie FD-BN și grupului de etape GED1-BN.

Grupul de Etape de Decompresie 1 (GED1 - BN)

Tabelul 4.21 Starea D_1 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D1am} = p_{C19am}$ = 19 bara			
$H_{D1} = H_{C19}$ = 180 m			
Presiunea parțială			
Stare	$p_{D1Ox} = p_{C19Ox}$ [bara]	$p_{D1Ni} = p_{C19Ni}$ [bara]	$p_{D1He} = p_{C19He}$ [bara]
$D_1 \equiv C_{19}$	1,1099	0,7899	17,0996
Participația masică			
Stare	$m_{D1Ox} = m_{C19Ox}$ [-]	$m_{D1Ni} = m_{C19Ni}$ [-]	$m_{D1He} = m_{C19He}$ [-]
$D_1 \equiv C_{19}$	0,2816	0,1757	0,5425
Participația volumică			
Stare	$r_{D1Ox} = r_{C19Ox}$ [-]	$r_{D1Ni} = r_{C19Ni}$ [-]	$r_{D1He} = r_{C19He}$ [-]
$D_1 \equiv C_{19}$	0,0583	0,0416	0,8999

Tabelul 4.22 D_2 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D2am} = 18 bara			
H_{D2} = 170 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{D2Ox} [bara]	p_{D2Ni} [bara]	p_{D2He} [bara]
D_2	1,0494	0,7495	16,1982
Participația masică			
Stare	m_{D2Ox} [-]	m_{D2Ni} [-]	m_{D2He} [-]
D_2	0,2813	0,1758	0,5428
Participația volumică			
Stare	r_{D2Ox} [-]	r_{D2Ni} [-]	r_{D2He} [-]
D_2	0,0583	0,0416	0,8999

Tabelul 4.23 Starea D_3 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D3am} = 17 bara			
H_{D3} = 160 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{D3Ox} [bara]	p_{D3Ni} [bara]	p_{D3He} [bara]
D_3	0,9911	0,7079	15,2983
Participația masică			
Stare	m_{D3Ox} [-]	m_{D3Ni} [-]	m_{D3He} [-]
D_3	0,2813	0,1758	0,5428
Participația volumică			
Stare	r_{D3Ox} [-]	r_{D3Ni} [-]	r_{D3He} [-]
D_3	0,0583	0,0416	0,8999

Tabelul 4.24 Starea D_4 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D4am} = 16 bara			
H_{D4} = 150 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{D4Ox} [bara]	p_{D4Ni} [bara]	p_{D4He} [bara]
D_4	0,9328	0,6662	14,3984
Participația masică			
Stare	m_{D4Ox} [-]	m_{D4Ni} [-]	m_{D4He} [-]
D_4	0,2813	0,1758	0,5428
Participația volumică			
Stare	r_{D4Ox} [-]	r_{D4Ni} [-]	r_{D4He} [-]
D_4	0,0583	0,0416	0,8999

Tabelul 4.25 Starea D_5 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D5am} = 15 bara			
H_{D5}= 140 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{D5Ox} [bara]	p_{D5Ni} [bara]	p_{D5He} [bara]
D_5	0,8745	0,5246	13,4985
Participația masică			
Stare	m_{D5Ox} [-]	m_{D4Ni} [-]	m_{D5He} [-]
D_5	0,2813	0,1758	0,5428
Participația volumică			
Stare	r_{D5Ox} [-]	r_{D5Ni} [-]	r_{D5He} [-]
D_5	0,0583	0,0416	0,8999

Tabelul 4.26 D_6 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D6am} = 14 bara			
H_{D6}= 130 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{D6Ox} [bara]	p_{D6Ni} [bara]	p_{D6He} [bara]
D_6	0,8162	0,5830	12,5986
Participația masică			
Stare	m_{D6Ox} [-]	m_{D6Ni} [-]	m_{D6He} [-]
D_6	0,2813	0,1758	0,5428
Participația volumică			
Stare	r_{D6Ox} [-]	r_{D6Ni} [-]	r_{D6He} [-]
D_6	0,0583	0,0416	0,8999

Tabelul 4.27 Starea D_7 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D7am} = 13 bara			
H_{D7}= 120 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{D7Ox} [bara]	p_{D7Ni} [bara]	p_{D7He} [bara]
D_7	0,7579	0,5413	11,6987
Participația masică			
Stare	m_{D7Ox} [-]	m_{D7Ni} [-]	m_{D7He} [-]
D_7	0,2813	0,1758	0,5428
Participația volumică			
Stare	r_{D7Ox} [-]	r_{D7Ni} [-]	r_{D7He} [-]
D_7	0,0583	0,0416	0,8999

Tabelul 4.28 Starea D_8 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D8am} = 12 bara			
H_{D8}= 110 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{D8Ox} [bara]	p_{D8Ni} [bara]	p_{D8He} [bara]
D_8	0,6996	0,4997	10,7988
Participația masică			
Stare	m_{D8Ox} [-]	m_{D8Ni} [-]	m_{D8He} [-]
D_8	0,2813	0,1758	0,5428
Participația volumică			
Stare	r_{D8Ox} [-]	r_{D8Ni} [-]	r_{D8He} [-]
D_8	0,0583	0,0416	0,8999

Tabelul 4.29 Starea D_9 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D9am} = 11 bara			
H_{D9}= 100 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{D9Ox} [bara]	p_{D9Ni} [bara]	p_{D9He} [bara]
D_9	0,6413	0,4580	9,8989
Participația masică			
Stare	m_{D9Ox} [-]	m_{D9Ni} [-]	m_{D9He} [-]
D_9	0,2813	0,1758	0,5428
Participația volumică			
Stare	r_{D9Ox} [-]	r_{D9Ni} [-]	r_{D9He} [-]
D_9	0,0583	0,0416	0,8999

Tabelul 4.30 Starea D_{10} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D10am} = 10,3 bara			
H_{D10}= 93 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{D10Ox} [bara]	p_{D10Ni} [bara]	p_{D10He} [bara]
D_{10}	0,6004	0,4285	9,2690
Participația masică			
Stare	m_{D10Ox} [-]	m_{D10Ni} [-]	m_{D10He} [-]
D_{10}	0,2813	0,1758	0,5428
Participația volumică			
Stare	r_{D10Ox} [-]	r_{D10Ni} [-]	r_{D10He} [-]
D_{10}	0,0583	0,0416	0,8999

4.2.2.2 Grupul de etape de decompresie 2 (GED2-BN)

Grupul de Etape de Decompresie 2 (GED2-BN) este alcătuit din **16 etape de calcul** (D_{10}-D_{11}, D_{11}-D_{12}... D_{25}-D_{26}) care realizează legătura între cele 17 stări aparținând grupului de etape GED2-BN (D_{10}, D_{11},...D_{26}).

Toate cele 16 etape de calcul ale GED2-BN se referă la decompresia scafandrilor, urmărindu-se menținerea constantă a presiunii parțiale a oxigenului la valoarea de 600 mbar (abs.). Pentru aceasta, fiecare din cele 16 etape de calcul sunt alcătuite din câte 2 subetape de calcul. În prima subetapă din cadrul unei etape de calcul, se decomprimă scafandrii prin depresurizarea barocamerei cu o anumită scădere de presiune (ex.de circa 0,5 bar), prin aceasta menținându-se constante participațiile volumice ale celor trei componente ale amestecului din barocameră (Ox, Ni, He), dar scăzându-se presiunea parțială a oxigenului sub 600 mbar (abs.). În cea de-a doua subetapă din cadrul unei etape de calcul, se presurizează ușor cu oxigen pur până când presiunea parțială a oxigenului redevine de 600 mbar (abs.).

Starea inițială a grupului de etape GED2-BN este starea D_{10} caracterizată prin $p_{D10,am}$ = 10,3 bara, H_{D10} = 93 m și $p_{D10,am}$ = 0,6004 bara = 600,4 mbar (abs.), iar starea finală este D_{26} caracterizată prin $p_{D26,am}$ = 2,445 bara, H_{D26} = 14,45 m și $p_{D26,am}$ = 0,600 bara = 600 mbar (abs.).

Relațiile generale de calcul pentru mărimile caracteristice stărilor D_{10}, D_{11},...D_{26} aferente grupului de etape GED2-BN, sunt prezentate în cele ce urmează.

$$m_i = r_i \cdot \frac{\mathcal{M}_i}{\mathcal{M}_{am}}$$

$$\mathcal{M}_{am} = \sum_{i=1}^{n} r_i \cdot \mathcal{M}_i$$

În relațiile de mai sus pentru grupul de etape GED2-BN -cuprinzând 16 etape, 32 subetape, 17 stări și 16 stări intermediare, indicele *i* este *i* = Ox, Ni, He.

În prima subetapă, se păstrează constante participația volumică și participația masică obținute în etapa anterioară – cu ajutorul relațiilor scrise mai sus - și știind presiunea amestecului care se impune, se calculează presiunea parțială a celor trei componente: Ox, Ni, He.

Relațiile aplicate pentru cele trei componente ale amestecului sunt:

$$p_{Dn'Ox} = r_{Dn'Ox} \cdot p_{Dn'am}$$

$$p_{Dn'Ni} = r_{Dn'Ni} \cdot p_{Dn'am}$$

$$p_{Dn'He} = r_{Dn'He} \cdot p_{Dn'am}$$

În a doua subetapă, este cunoscută presiunea amestecului -este egală cu cea din subetapa anterioară și presiunea parțială a oxigenului p_{Ox}, pe care, o impun la 0,6 [bara]. Astfel, cunoscând presiunea parțială a amestecului, respectiv presiunile parțiale ale celor trei componente, se pot calcula participațiile volumice, ale acestora. O data aflate și acestea se pot calcula participațiile masice ale oxigenului, azotului și heliului, după ce se calculează și $\mathcal{M}_{am}$.

Grupul de Etape de Decompresie 2 (GED2 - BN)

Tabelul 4.31 Starea D_{10} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D10am} = 10,3 bara			
H_{D10}= 93 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{D10Ox} [bara]	p_{D10Ni} [bara]	p_{D10He} [bara]
D_{10}	0,6004	0,4285	9,2690
Participația masică			
Stare	m_{D10Ox} [-]	m_{D10Ni} [-]	m_{D10He} [-]
D_{10}	0,2813	0,1758	0,5428
Participația volumică			
Stare	r_{D10Ox} [-]	r_{D10Ni} [-]	r_{D10He} [-]
D_{10}	0,0583	0,0416	0,8999

Tabelul 4.32 Starea intermediară $D_{10'}$ – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D10'am}$ = 9,8 bara			
$H_{D10'}$ = 88 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{D10Ox} [bara]	p_{D10Ni} [bara]	$p_{D10'He}$ [bara]
$D_{10'}$	0,5713	0,4076	8,8190
Participația masică			
Stare	$m_{D10'Ox}$ [-]	$m_{D10'Ni}$ [-]	$m_{D10'He}$ [-]
$D_{10'}$	0,2813	0,1758	0,5428
Participația volumică			
Stare	$r_{D10'Ox}$ [-]	$r_{D10'Ni}$ [-]	$r_{D10'He}$ [-]
$D_{10'}$	0,0583	0,0416	0,8999

Tabelul 4.33 Starea D_{11} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D11am} = 9,83 bara			
H_{D11}= 88,3 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{D11Ox} [bara]	p_{D11Ni} [bara]	p_{D11He} [bara]
D_{11}	0,6	0,4076	8,8190
Participația masică			
Stare	m_{D11Ox} [-]	m_{D11Ni} [-]	m_{D11He} [-]
D_{11}	0,2912	0,1734	0,5354
Participația volumică			
Stare	r_{D11Ox} [-]	r_{D11Ni} [-]	r_{D11He} [-]
D_{11}	0,0610	0,0415	0,8972

Tabelul 4.34 Starea intermediară $D_{11'}$ – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D11'am}$ = 9,33 bara			
$H_{D11'}$= 83,3 m			
Presiunea parțială			
Stare	$p_{D11'Ox}$ [bara]	$p_{D11'Ni}$ [bara]	$p_{D11'He}$ [bara]
$D_{11'}$	0,5691	0,3872	8,3708
Participația masică			
Stare	$m_{D11'Ox}$ [-]	$m_{D11'Ni}$ [-]	$m_{D11'He}$ [-]
$D_{11'}$	0,2912	0,1734	0,5354
Participația volumică			
Stare	$r_{D11'Ox}$ [-]	$r_{D11'Ni}$ [-]	$r_{D11'He}$ [-]
$D_{11'}$	0,0610	0,0415	0,8972

Tabelul 4.35 Starea D_{12} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D12am} = 9,358 bara			
H_{D12}= 83,58 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{D12Ox} [bara]	p_{D12Ni} [bara]	p_{D12He} [bara]
D_{12}	0,6	0,3872	8,3708
Participația masică			
Stare	m_{D12Ox} [-]	m_{D12Ni} [-]	m_{D12He} [-]
D_{12}	0,3022	0,1708	0,5271
Participația volumică			
Stare	r_{D12Ox} [-]	r_{D12Ni} [-]	r_{D12He} [-]
D_{12}	0,0641	0,0414	0,8945

Tabelul 4.36 Starea intermediară $D_{12'}$ – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D12'am}$ = 8,858 bara			
$H_{D12'}$= 78,58 m			
Presiunea parțială			
Stare	$p_{D12'Ox}$ [bara]	$p_{D12'Ni}$ [bara]	$p_{D12'He}$ [bara]
$D_{12'}$	0,5678	0,3667	7,9234
Participația masică			
Stare	$m_{D12'Ox}$ [-]	$m_{D12'Ni}$ [-]	$m_{D12'He}$ [-]
$D_{12'}$	0,3022	0,1708	0,5271
Participația volumică			
Stare	$r_{D12'Ox}$ [-]	$r_{D12'Ni}$ [-]	$r_{D12'He}$ [-]
$D_{12'}$	0,0641	0,0414	0,8945

Tabelul 4.37 Starea D_{13} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D13am} = 8,8901 bara			
H_{D13}= 78,901 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{D13Ox} [bara]	p_{D13Ni} [bara]	p_{D13He} [bara]
D_{13}	0,6	0,3667	7,9234
Participația masică			
Stare	m_{D13Ox} [-]	m_{D13Ni} [-]	m_{D13He} [-]
D_{13}	0,3140	0,1677	0,5183
Participația volumică			
Stare	r_{D13Ox} [-]	r_{D13Ni} [-]	r_{D13He} [-]
D_{13}	0,0675	0,0412	0,8913

Tabelul 4.38 Starea intermediară $D_{13'}$ – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D13'am}$ = 8,3901 bara			
$H_{D13'}$= 73,901 m			
Presiunea parțială			
Stare	$p_{D13'Ox}$ [bara]	$p_{D13'Ni}$ [bara]	$p_{D13'He}$ [bara]
D13'	0,5663	0,3457	7,4781
Participația masică			
Stare	$m_{D13'Ox}$ [-]	$m_{D13'Ni}$ [-]	$m_{D13'He}$ [-]
D13'	0,3140	0,1677	0,5183
Participația volumică			
Stare	$r_{D13'Ox}$ [-]	$r_{D13'Ni}$ [-]	$r_{D13'He}$ [-]
D13'	0,0675	0,0412	0,8913

Tabelul 4.39 Starea D_{14} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D14am} = 8,4238 bara			
H_{D14}= 74,238 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{D14Ox} [bara]	p_{D14Ni} [bara]	p_{D14He} [bara]
D_{14}	0,6	0,3457	7,4781
Participația masică			
Stare	m_{D14Ox} [-]	m_{D14Ni} [-]	m_{D14He} [-]
D_{14}	0,3265	0,1645	0,5089
Participația volumică			
Stare	r_{D14Ox} [-]	r_{D14Ni} [-]	r_{D14He} [-]
D_{14}	0,0712	0,0410	0,8877

Tabelul 4.40 Starea intermediară $D_{14'}$ – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D14'am}$ = 7,9238 bara			
$H_{D14'}$= 69,238 m			
Presiunea parțială			
Stare	$p_{D14'Ox}$ [bara]	$p_{D14'Ni}$ [bara]	$p_{D14'He}$ [bara]
$D_{14'}$	0,5642	0,3249	7,0341
Participația masică			
Stare	$m_{D14'Ox}$ [-]	$m_{D14'Ni}$ [-]	$m_{D14'He}$ [-]
$D_{14'}$	0,3265	0,1645	0,5089
Participația volumică			
Stare	$r_{D14'Ox}$ [-]	$r_{D14'Ni}$ [-]	$r_{D14'He}$ [-]
$D_{14'}$	0,0712	0,0410	0,8877

Tabelul 4.41 Starea D_{15} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D15am} = 7,959 bara			
H_{D15}= 69,59 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{D15Ox} [bara]	p_{D15Ni} [bara]	p_{D15He} [bara]
D_{15}	0,6	0,3249	7,0341
Participația masică			
Stare	m_{D15Ox} [-]	m_{D15Ni} [-]	m_{D15He} [-]
D_{15}	0,3403	0,1611	0,4986
Participația volumică			
Stare	r_{D15Ox} [-]	r_{D15Ni} [-]	r_{D15He} [-]
D_{15}	0,0754	0,0408	0,8838

Tabelul 4.42 Starea intermediară $D_{15'}$ – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D15'am}$ = 7,459 bara			
$H_{D15'}$= 64,59 m			
Presiunea parțială			
Stare	$p_{D15'Ox}$ [bara]	$p_{D15'Ni}$ [bara]	$p_{D15'He}$ [bara]
$D_{15'}$	0,5624	0,3043	6,5923
Participația masică			
Stare	$m_{D15'Ox}$ [-]	$m_{D15'Ni}$ [-]	$m_{D15'He}$ [-]
$D_{15'}$	0,3403	0,1611	0,4986
Participația volumică			
Stare	$r_{D15'Ox}$ [-]	$r_{D15'Ni}$ [-]	$r_{D15'He}$ [-]
$D_{15'}$	0,0754	0,0408	0,8838

Tabelul 4.43 Starea D_{16} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D16am} = 7,4966 bara			
H_{D16}= 64,966 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{D16Ox} [bara]	p_{D16Ni} [bara]	p_{D16He} [bara]
D_{16}	0,6	0,3043	6,5923
Participația masică			
Stare	m_{D16Ox} [-]	m_{D16Ni} [-]	m_{D16He} [-]
D_{16}	0,3548	0,1576	0,4876
Participația volumică			
Stare	r_{D16Ox} [-]	r_{D16Ni} [-]	r_{D16He} [-]
D_{16}	0,0800	0,0406	0,8794

Tabelul 4.44 Starea intermediară $D_{16'}$ – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D16'am}$ = 6,9966 bara			
$H_{D16'}$= 59,966 m			
Presiunea parțială			
Stare	$p_{D16'Ox}$ [bara]	$p_{D16'Ni}$ [bara]	$p_{D16'He}$ [bara]
$D_{16'}$	0,5597	0,2841	6,1528
Participația masică			
Stare	$m_{D16'Ox}$ [-]	$m_{D16'Ni}$ [-]	$m_{D16'He}$ [-]
$D_{16'}$	0,3548	0,1576	0,4876
Participația volumică			
Stare	$r_{D16'Ox}$ [-]	$r_{D16'Ni}$ [-]	$r_{D16'He}$ [-]
$D_{16'}$	0,0800	0,0406	0,8794

Tabelul 4.45 Starea D_{17} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D17am} = 7,0369 bara			
H_{D17}= 60,369 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{D17Ox} [bara]	p_{D17Ni} [bara]	p_{D17He} [bara]
D_{17}	0,6	0,2841	6,1528
Participația masică			
Stare	m_{D17Ox} [-]	m_{D17Ni} [-]	m_{D17He} [-]
D_{17}	0,3710	0,1537	0,4753
Participația volumică			
Stare	r_{D17Ox} [-]	r_{D17Ni} [-]	r_{D17He} [-]
D_{17}	0,0853	0,0404	0,8743

Tabelul 4.46 Starea intermediară $D_{17'}$ – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D17'am}$ = 6,5369 bara			
$H_{D17'}$= 55,369 m			
Presiunea parțială			
Stare	$p_{D17'Ox}$ [bara]	$p_{D17'Ni}$ [bara]	$p_{D17'He}$ [bara]
$D_{17'}$	0,5576	0,2641	5,7152
Participația masică			
Stare	$m_{D17'Ox}$ [-]	$m_{D17'Ni}$ [-]	$m_{D17'He}$ [-]
$D_{17'}$	0,3710	0,1537	0,4753
Participația volumică			
Stare	$r_{D17'Ox}$ [-]	$r_{D17'Ni}$ [-]	$r_{D17'He}$ [-]
$D_{17'}$	0,0853	0,0404	0,8743

Tabelul 4.47 Starea D_{18} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D18am} = 6,5793 bara			
H_{D18}= 55,793 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{D18Ox} [bara]	p_{D18Ni} [bara]	p_{D18He} [bara]
D_{18}	0,6	0,2641	5,7152
Participația masică			
Stare	m_{D18Ox} [-]	m_{D18Ni} [-]	m_{D18He} [-]
D_{18}	0,3883	0,1494	0,4623
Participația volumică			
Stare	r_{D18Ox} [-]	r_{D18Ni} [-]	r_{D18He} [-]
D_{18}	0,0912	0,0401	0,8687

Tabelul 4.48 Starea intermediară $D_{18'}$ – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D18'am}$ = 6,0793 bara			
$H_{D18'}$= 50,793 m			
Presiunea parțială			
Stare	$p_{D18'Ox}$ [bara]	$p_{D18'Ni}$ [bara]	$p_{D18'He}$ [bara]
$D_{18'}$	0,5544	0,2438	5,2811
Participația masică			
Stare	$m_{D18'Ox}$ [-]	$m_{D18'Ni}$ [-]	$m_{D18'He}$ [-]
$D_{18'}$	0,3883	0,1494	0,4623
Participația volumică			
Stare	$r_{D18'Ox}$ [-]	$r_{D18'Ni}$ [-]	$r_{D18'He}$ [-]
$D_{18'}$	0,0912	0,0401	0,8687

Tabelul 4.49 Starea D_{19} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D19am} = 6,1249 bara			
H_{D19}= 51,249 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{D19Ox} [bara]	p_{D19Ni} [bara]	p_{D19He} [bara]
D_{19}	0,6	0,2438	5,2811
Participația masică			
Stare	m_{D19Ox} [-]	m_{D19Ni} [-]	m_{D19He} [-]
D_{19}	0,4073	0,1447	0,4479
Participația volumică			
Stare	r_{D19Ox} [-]	r_{D19Ni} [-]	r_{D19He} [-]
D_{19}	0,0980	0,0398	0,8622

Tabelul 4.50 Starea intermediară $D_{19'}$ – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D19'am}$ = 5,6249 bara			
$H_{D19'}$= 46,249 m			
Presiunea parțială			
Stare	$p_{D19'Ox}$ [bara]	$p_{D19'Ni}$ [bara]	$p_{D19'He}$ [bara]
$D_{19'}$	0,5512	0,2239	4,8498
Participația masică			
Stare	$m_{D19'Ox}$ [-]	$m_{D19'Ni}$ [-]	$m_{D19'He}$ [-]
$D_{19'}$	0,4073	0,1447	0,4479
Participația volumică			
Stare	$r_{D19'Ox}$ [-]	$r_{D19'Ni}$ [-]	$r_{D19'He}$ [-]
$D_{19'}$	0,0980	0,0398	0,8622

Tabelul 4.51 Starea D_{20} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D20am} = 5,6737 bara			
H_{D20}= 46,737 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{D20Ox} [bara]	p_{D20Ni} [bara]	p_{D20He} [bara]
D_{20}	0,6	0,2239	4,8498
Participația masică			
Stare	m_{D20Ox} [-]	m_{D20Ni} [-]	m_{D20He} [-]
D_{20}	0,4277	0,1399	0,4324
Participația volumică			
Stare	r_{D20Ox} [-]	r_{D20Ni} [-]	r_{D20He} [-]
D_{20}	0,1057	0,0395	0,8548

Tabelul 4.52 Starea intermediară $D_{20'}$ – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D20'am}$ = 5,1737 bara			
$H_{D20'}$= 41,737 m			
Presiunea parțială			
Stare	$p_{D20'Ox}$ [bara]	$p_{D20'Ni}$ [bara]	$p_{D20'He}$ [bara]
$D_{20'}$	0,5469	0,2044	4,4225
Participația masică			
Stare	$m_{D20'Ox}$ [-]	$m_{D20'Ni}$ [-]	$m_{D20'He}$ [-]
$D_{20'}$	0,4277	0,1399	0,4324
Participația volumică			
Stare	$r_{D20'Ox}$ [-]	$r_{D20'Ni}$ [-]	$r_{D20'He}$ [-]
$D_{20'}$	0,1057	0,0395	0,8548

Tabelul 4.53 Starea D_{21} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D21am} = 5,2269 bara			
H_{D21}= 42,269 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{D21Ox} [bara]	p_{D21Ni} [bara]	p_{D21He} [bara]
D_{21}	0,6	0,2044	4,4225
Participația masică			
Stare	m_{D21Ox} [-]	m_{D21Ni} [-]	m_{D21He} [-]
D_{21}	0,4506	0,1343	0,4151
Participația volumică			
Stare	r_{D21Ox} [-]	r_{D21Ni} [-]	r_{D21He} [-]
D_{21}	0,1148	0,0391	0,8461

Tabelul 4.54 Starea intermediară $D_{21'}$ – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D21'am}$ = 4,7269 bara			
$H_{D21'}$= 37,269 m			
Presiunea parțială			
Stare	$p_{D21'Ox}$ [bara]	$p_{D21'Ni}$ [bara]	$p_{D21'He}$ [bara]
$D_{21'}$	0,5427	0,1848	3,9994
Participația masică			
Stare	$m_{D21'Ox}$ [-]	$m_{D21'Ni}$ [-]	$m_{D21'He}$ [-]
$D_{21'}$	0,4506	0,1343	0,4151
Participația volumică			
Stare	$r_{D21'Ox}$ [-]	$r_{D21'Ni}$ [-]	$r_{D21'He}$ [-]
$D_{21'}$	0,1148	0,0391	0,8461

Tabelul 4.55 Starea D_{22} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D22am} = 4,7842 bara			
H_{D22}= 37,842 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{D22Ox} [bara]	p_{D22Ni} [bara]	p_{D22He} [bara]
D_{22}	0,6	0,1848	3,9994
Participația masică			
Stare	m_{D22Ox} [-]	m_{D22Ni} [-]	m_{D22He} [-]
D_{22}	0,4756	0,1281	0,3963
Participația volumică			
Stare	r_{D22Ox} [-]	r_{D22Ni} [-]	r_{D22He} [-]
D_{22}	0,1254	0,0386	0,8360

Tabelul 4.56 Starea intermediară $D_{22'}$ – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D22'am}$ = 4,2842 bara			
$H_{D22'}$= 32,842 m			
Presiunea parțială			
Stare	$p_{D22'Ox}$ [bara]	$p_{D22'Ni}$ [bara]	$p_{D22'He}$ [bara]
$D_{22'}$	0,5372	0,1654	3,5816
Participația masică			
Stare	$m_{D22'Ox}$ [-]	$m_{D22'Ni}$ [-]	$m_{D22'He}$ [-]
$D_{22'}$	0,4756	0,1281	0,3963
Participația volumică			
Stare	$r_{D22'Ox}$ [-]	$r_{D22'Ni}$ [-]	$r_{D22'He}$ [-]
$D_{22'}$	0,1254	0,0386	0,8360

Tabelul 4.57 Starea D_{23} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D23am} = 4,3470 bara			
H_{D23}= 32 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{D23Ox} [bara]	p_{D23Ni} [bara]	p_{D23He} [bara]
D_{23}	0,6	0,1654	3,5816
Participația masică			
Stare	m_{D23Ox} [-]	m_{D23Ni} [-]	m_{D23He} [-]
D_{23}	0,5032	0,1212	0,3755
Participația volumică			
Stare	r_{D23Ox} [-]	r_{D23Ni} [-]	r_{D23He} [-]
D_{23}	0,1380	0,0380	0,8239

Tabelul 4.58 Starea intermediară $D_{23'}$ – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D23'am}$ = 3,847 bara			
$H_{D23'}$= 28,47 m			
Presiunea parțială			
Stare	$p_{D23'Ox}$ [bara]	$p_{D23'Ni}$ [bara]	$p_{D23'He}$ [bara]
$D_{23'}$	0,5309	0,1462	3,1695
Participația masică			
Stare	$m_{D23'Ox}$ [-]	$m_{D23'Ni}$ [-]	$m_{D23'He}$ [-]
$D_{23'}$	0,5032	0,1212	0,3755
Participația volumică			
Stare	$r_{D23'Ox}$ [-]	$r_{D23'Ni}$ [-]	$r_{D23'He}$ [-]
$D_{23'}$	0,1380	0,0380	0,8239

Tabelul 4.59 Starea D_{24} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D24am} = 3,9157 bara			
H_{D24}= 29,157 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{D24Ox} [bara]	p_{D24Ni} [bara]	p_{D24He} [bara]
D_{24}	0,6	0,1462	3,1695
Participația masică			
Stare	m_{D24Ox} [-]	m_{D24Ni} [-]	m_{D24He} [-]
D_{24}	0,5338	0,1137	0,3525
Participația volumică			
Stare	r_{D24Ox} [-]	r_{D24Ni} [-]	r_{D24He} [-]
D_{24}	0,1532	0,0373	0,8094

Tabelul 4.60 Starea intermediară $D_{24'}$ – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D24'am}$ = 3,4157bara			
$H_{D24'}$= 24,157 m			
Presiunea parțială			
Stare	$p_{D24'Ox}$ [bara]	$p_{D24'Ni}$ [bara]	$p_{D24'He}$ [bara]
$D_{24'}$	0,5233	0,1274	2,7647
Participația masică			
Stare	$m_{D24'Ox}$ [-]	$m_{D24'Ni}$ [-]	$m_{D24'He}$ [-]
$D_{24'}$	0,5338	0,1137	0,3525
Participația volumică			
Stare	$r_{D24'Ox}$ [-]	$r_{D24'Ni}$ [-]	$r_{D24'He}$ [-]
$D_{24'}$	0,1532	0,0373	0,8094

Tabelul 4.61 Starea D_{25} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D25am} = 3,4921 bara			
H_{D25}= 24,921 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{D25Ox} [bara]	p_{D25Ni} [bara]	p_{D25He} [bara]
D_{25}	0,6	0,1274	2,7647
Participația masică			
Stare	m_{D25Ox} [-]	m_{D25Ni} [-]	m_{D25He} [-]
D_{25}	0,5676	0,1055	0,3269
Participația volumică			
Stare	r_{D25Ox} [-]	r_{D25Ni} [-]	r_{D25He} [-]
D_{25}	0,1718	0,0365	0,7917

Tabelul 4.62 Starea D_{26}– Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D26am} = 2,445 bara			
H_{D26}= 14,45 m			
Presiunea parțială			
Stare	p_{D26Ox} [bara]	p_{D26Ni} [bara]	p_{D26He} [bara]
D_{26}	0,6	0,0814	1,7636
Participația masică			
Stare	m_{D26Ox} [-]	m_{D26Ni} [-]	m_{D26He} [-]
D_{26}	0,6729	0,0799	0,2472
Participația volumică			
Stare	r_{D26Ox} [-]	r_{D26Ni} [-]	r_{D26He} [-]
D_{26}	0,2454	0,0333	0,7213

Variația presiunilor parțiale ale componentelor amestecului cu adâncimea de scufundare, în faza de decompresie, obținute prin calcul și prezentate în tabelele 4.21, 4.22,...4.62, este reprezentată grafic în figura 4.6.

Variația participațiilor masice ale componentelor amestecului cu adâncimea de scufundare, în faza de decompresie, obținute prin calcul și prezentate în tabelele 4.21, 4.22,...4.62, este reprezentată grafic în figura 4.7.

Variația participațiilor volumice ale componentelor amestecului cu adâncimea de scufundare, în faza de decompresie, obținute prin calcul și prezentate în tabelele 4.21, 4.22,....4.62, este reprezentată grafic în figura 4.8.

4.2.2.3 Etapa finală de decompresie (EFD-BN)

Etapa Finală de Decompresie (EFD-BN) constă în decompresia scafandrilor prin depresurizarea barocamerei cu amestecul existent în barocameră la starea D_{26}, paticipațiile volumice ale celor trei componente (Ox, Ni, He) rămânând constante până când se atinge presiunea atmosferică.

În tot acest timp, pe ultimii 25 m, scafandrii respiră amestecul existent în barocameră caracterizat printr-o concentrație a oxigenului de 24,54 % (r_{Ox} = 0.2454).

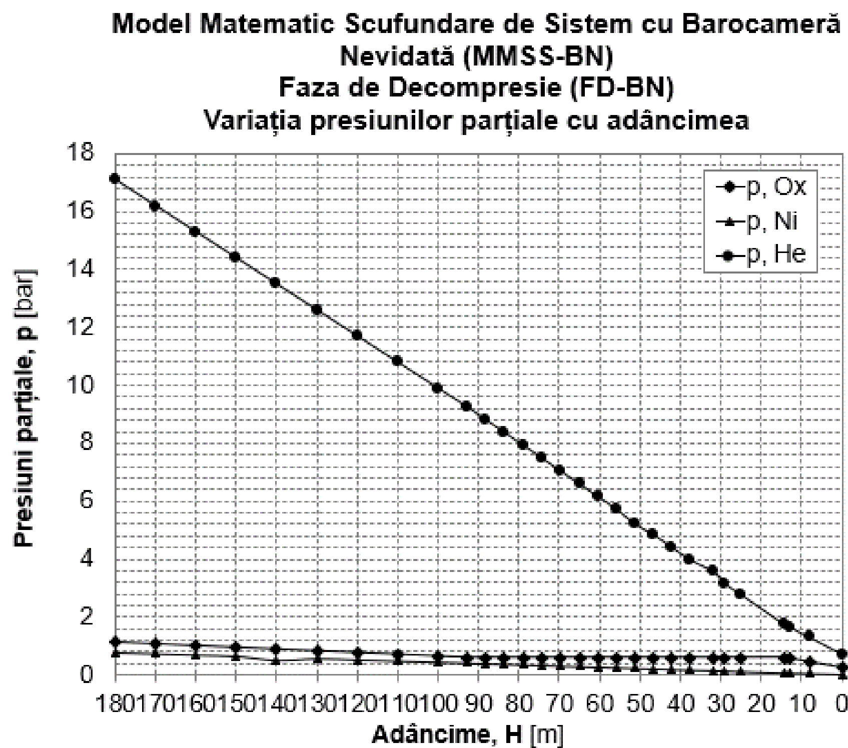


Figura 4.6 Variația presiunilor parțiale ale componentelor amestecului ternar din barocameră, cu adâncimea, în faza de decompresie, FD-BN

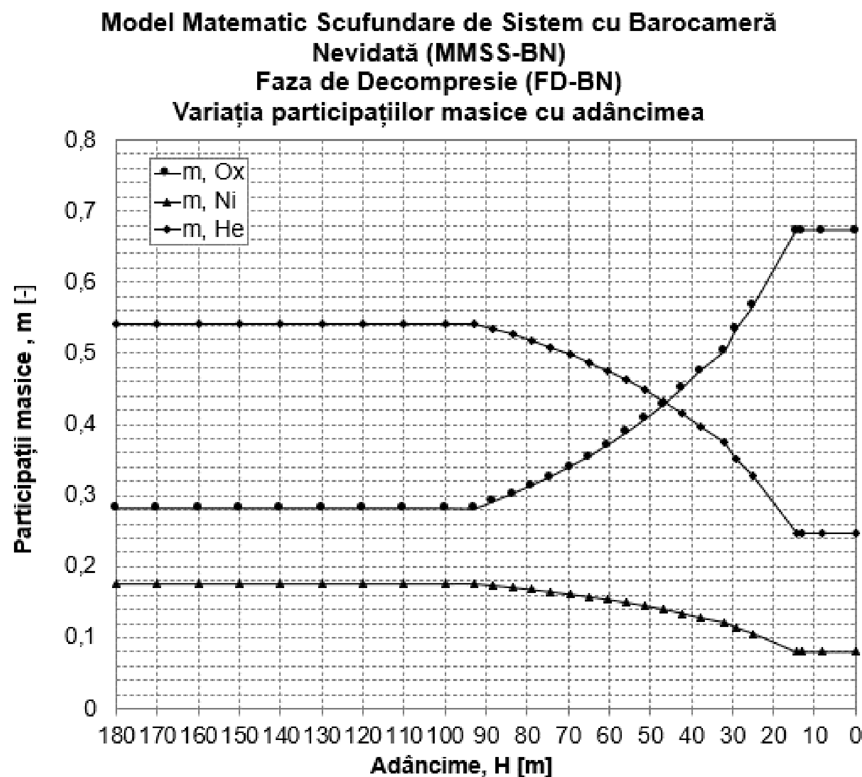


Figura 4.7 Variația participațiilor masice ale componentelor amestecului ternar din barocameră, cu adâncimea, în faza de decompresie, FD-BN

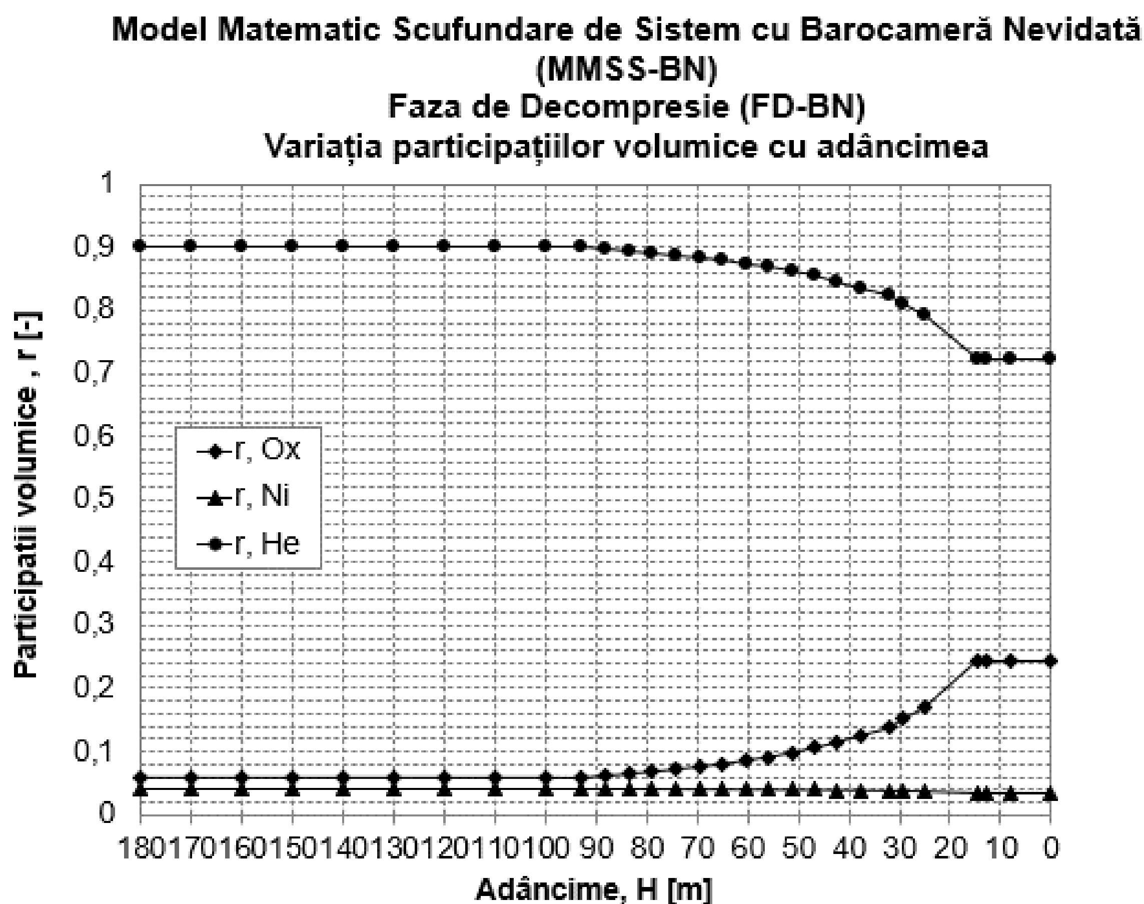


Figura 4.8 Variația participațiilor volumice ale componentelor amestecului ternar din barocameră, cu adâncimea, în faza de decompresie, FD-BN

4.3 PLANUL UNEI SCUFUNDĂRI DE SISTEM, REALE, LA ADÂNCIMEA DE 180 M, CU BAROCAMERĂ VIDATĂ (PSSR-BV)

În cele ce urmează, se prezintă **Planul unei Scufundări de Sistem, Reale, pentru cazul cu Barocameră Vidată (PSSR-BV)**. Această scufundare, la adâncimea de 180 m, este de tip test, cu amestec binar HELIOX 5/95 (5% Ox, 95% He) cu urmărirea comportamentului scafandrilor de mare adâncime la Sindromul Nervos al Înaltelor Presiuni (SNIP). Acest plan de scufundare a fost furnizat de către Centrul de Scafandri Constanța, al Forțelor Navale Române. O astfel de scufundare de sistem are trei faze și anume: compresia, staționarea la „nivelul de viață” și decompresia. Caracteristicile generale ale acestei scufundări sunt: viteza de presurizare este de 10 m/s, timpul de staționare la 180 m, care este de maximum 60 minute, timpul de decompresie care este de 38,2 ore.

Acest plan de scufundare, prin elementele lui caracteristice, stă la baza realizării Modelului Matematic al unei Scufundări în Saturație pentru cazul Barocamerei Vidate (MMSS-BV) prezentat în paragraful 4.4, iar scufundarea reală s-a folosit pentru validarea acestui model.

O astfel de scufundare, reală, urmărită în cazul acestei lucrări, a fost realizată într-una din barocamerele Laboratorului Hiperbar al Centrului de Scafandri Constanța, din cadrul Forțelor Navale Române, cu vidarea inițială a barocamerei și cu urmărirea, la decompresie, a presiunii parțiale a oxigenului, impusă de tehnologia folosită, la 650 mbar (abs.).

Barocamera utilizată pentru această scufundare simulată, instalația de stocare a gazelor respiratorii, panoul de furnizare a amestecurilor de gaze către barocameră și de control a compresiei și decompresiei scafandrilor, sistemul de analiză a gazelor din barocameră și aspecte din timpul scufundării simulate sunt prezentate în figurile 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 și respectiv 4.13.



Figura 4.9 Scafandrii Centrului de Scafandri Constanța în timpul scufundării test la 180 m, cu amestec HELIOX 5/95 efectuate în barocamera Laboratorului Hiperbar – imagine preluată prin sistemul video al barocamerei

Amestecul respirator folosit pentru compresia scafandrilor prin presurizarea barocamerei este HELIOX 5/95 (5% Ox, 95% He). În afară de acest amestec folosit în faza de compresie și în perioada staționării la nivelul de viață (NV), se mai pregătesc, pentru eventuale accidente de scufundare și câteva amestecuri terapeutice specifice pentru diferitele intervale de adâncimi la care pot surveni accidentele în faza de decompresie și anume: HELIOX 10/90 pentru adâncimi de 180 - 130 m, HELIOX 18/82 pentru adâncimi de 102 - 58 m, HELIOX 23/77 pentru adâncimi de 57-25 m și HELIOX 50/50 pentru adâncimi de 24 - 10 m. De asemenea, pentru accidente care apar la adâncimi de 10 - 0 m se folosește oxigen pur.



Figura 4.10 Instalația de stocare a gazelor și amestecurilor de gaze din Laboratorul Hiperbar



Figura 4.11 Panoul de control a compresiei și decompresiei scafandrilor din barocameră și de urmărire a acestora



Figura 4.12 Panoul de furnizare a gazelor și a amestecurilor de gaze către barocameră



Figura 4.13 Sistemul de analiză a gazelor din barocameră

Parametrii care trebuie respectați pentru acest tip de scufundare sunt: concentrația oxigenului de 5% pentru adâncimi cuprinse între 180 și 120 m, iar pentru adâncimile cuprinse între 16 și 0 m de 25%. Temperatura trebuie menținută în intervalul 25 - 27^{o} C, umiditatea între 60 și 80%, iar viteza procesului de decompresie trebuie să respecte OXY-HELIUM DIVING DECOMPRESSION TABLES.

În continuare, se prezintă sintetic, caracteristicile scufundării, amestecurile de gaze și gazele pure utilizate și pregătite, parametrii ce trebuie urmăriți și menținuți și tabela de decompresie OXY-HELIUM DIVING DECOMPRESSION TABLES completată cu mărimile caracteristice ale amestecului (tabelul 4.63).

Caracteristicile scufundării de sistem:

- adâncimea maximă: 180 metri;
- durata presurizării: 18 minute;
- viteza de presurizare: 10 m/min;
- durata staționării la adâncimea de 180 m: maxim 60 minute;
- durata decompresiei: 38,2 ore;
- tabela de decompresie utilizată - OXY- HELIUM DIVING DECOMPRESSION TABLES.

Amestecurile de gaze și gaze pure necesare:

- amestec de presurizare: HELIOX 5/95 %;
- amestec respirator la nivel de viață: HELIOX 5/95 %;
- amestec terapeutic pentru adâncimea de 180 m ÷ 103 m: HELIOX 10/90 %;
- amestec terapeutic pentru adâncimea de 102 m ÷ 58 m: HELIOX 18/82 %;
- amestec terapeutic pentru adâncimea de 57 m ÷ 25 m: HELIOX 23/77 %;
- amestec terapeutic pentru adâncimea de 24 m ÷ 10 m: HELIOX 50/50 %;
- amestec terapeutic pentru adâncimea de 10 m ÷ 0 m: Oxigen pur.

Parametri de trebuie menținuți în timpul scufundării:

- Oxigen
  - în intervalul de adâncime 180 m ÷ 120 m: r_{Ox} = 0,05 (concentrație de 5 %);
  - în intervalul de adâncime 120 m ÷ 16 m: p_{Ox} = 650 mbar (abs.);
  - în intervalul de adâncime 16 m ÷ 0 m: r_{Ox} = 0,25 (concentrație de 25 %).
- Dioxid de carbon
  - maximum 6 mbar (abs.).
- Temperatura din barocameră: se menține în jurul valorii de 25 ÷ 27^0 C;
- Umiditatea din barocameră: 60 ÷ 80 %;
- Viteza de decompresie: conform OXY-HELIUM DIVING DECOMPRESSION TABLES.

În figura 4.14 se prezintă profilul scufundării conform PSS-BV cu cele trei faze constituente și anume: compresia, staționarea la “nivelul de viață” și decompresia.

Tabelul 4.63 Tabela de decompresiei OXY- HELIUM DIVING DECOMPRESSION completată cu caracteristicile amestecului din barocameră la fiecare adâncime

TIMP [oră.min]	**H** [m]	**Ox** [%]	r_{Ox} [-]	r_{He} [-]	p_{am} [bara]	p_{Ox} [bara]	p_{He} [bara]	m_{Ox} [-]	m_{He} [-]
00.00	180	5	0,05	0,95	19	0,9500	18,05	0,2961	0,7039
00.01	179	5	0,05	0,95	18,9	0,9450	17,955	0,2961	0,7039
00.02	178	5	0,05	0,95	18,8	0,9400	17,86	0,2961	0,7039
00.03	177	5	0,05	0,95	18,7	0,9350	17,765	0,2961	0,7039
00.04	176	5	0,05	0,95	18,6	0,9300	17,67	0,2961	0,7039
00.05	175	5	0,05	0,95	18,5	0,9250	17,675	0,2961	0,7039
00.06	174	5	0,05	0,95	18,4	0,9200	17,48	0,2961	0,7039
00.07	173	5	0,05	0,95	18,3	0,9150	17,385	0,2961	0,7039
00.08	172	5	0,05	0,95	18,2	0,9100	17,29	0,2961	0,7039
00.09	171	5	0,05	0,95	18,1	0,9050	17,195	0,2961	0,7039
00.10	170	5	0,05	0,95	18	0,9000	17,1	0,2961	0,7039
00.11	169	5	0,05	0,95	17,9	0,8950	17,005	0,2961	0,7039
00.12	168	5	0,05	0,95	17,8	0,8900	16,91	0,2961	0,7039
00.13	167	5	0,05	0,95	17,7	0,8850	16,815	0,2961	0,7039
00.14	166	5	0,05	0,95	17,6	0,8800	16,72	0,2961	0,7039
00.16	165	5	0,05	0,95	17,5	0,8750	16,625	0,2961	0,7039
00.18	164	5	0,05	0,95	17,4	0,8700	16,53	0,2961	0,7039
00.20	163	5	0,05	0,95	17,3	0,8650	16,435	0,2961	0,7039
00.22	162	5	0,05	0,95	17,2	0,8600	16,34	0,2961	0,7039
00.24	161	5	0,05	0,95	17,1	0,8550	16,245	0,2961	0,7039
00.26	160	5	0,05	0,95	17	0,8500	16,15	0,2961	0,7039
00.28	159	5	0,05	0,95	16,9	0,8450	16,055	0,2961	0,7039
00.57	126	5	0,05	0,95	13,6	0,6800	12,92	0,2961	0,7039
00.58	125	5	0,05	0,95	13,5	0,6750	12,825	0,2961	0,7039
00.59	124	5	0,05	0,95	13,4	0,6700	12,73	0,2961	0,7039
01.00	123	5	0,05	0,95	13,3	0,6650	12,635	0,2961	0,7039
01.01	122	5	0,05	0,95	13,2	0,6600	12,54	0,2961	0,7039
01.02	121	5	0,05	0,95	13,1	0,6550	12,445	0,2961	0,7039
01.03	120	5	0,05	0,95	13	0,6500	11,35	0,2961	0,7039
01.04	119	5,1	0,051	0,949	12,9	0,6579	12,2421	0,3005	0,6995
01.05	118	5,1	0,051	0,949	12,8	0,6528	12,1472	0,3005	0,6995
01.06	117	5,2	0,051	0,949	12,7	0,6477	12,0523	0,3048	0,6952
01.07	116	5,2	0,052	0,948	12,6	0,6552	11,9448	0,3048	0,6952
01.08	115	5,2	0,052	0,948	12,5	0,6500	11,85	0,3048	0,6952
01.09	114	5,3	0,053	0,947	12,4	0,6572	11,7428	0,3091	0,6909
01.10	113	5,3	0,053	0,947	12,3	0,6519	11,6481	0,3091	0,6909
01.11	112	5,4	0,054	0,946	12,2	0,6588	11,5412	0,3133	0,6867
01.13	111	5,4	0,054	0,946	12,1	0,6534	11,4466	0,3133	0,6867
01.16	110	5,5	0,055	0,945	12	0,6600	11,34	0,3175	0,6825
01.19	109	5,5	0,055	0,945	11,9	0,6545	11,2455	0,3175	0,6825
01.22	108	5,6	0,056	0,944	11,8	0,6608	11,1392	0,3217	0,6783
01.25	107	5,6	0,056	0,944	11,7	0,6552	11,0448	0,3217	0,6783
01.28	106	5,7	0,057	0,943	11,6	0,6612	10,9388	0,3258	0,6742
01.31	105	5,7	0,057	0,943	11,5	0,6555	10,8445	0,3258	0,6742
01.34	104	5,8	0,058	0,942	11,4	0,6612	10,7388	0,3299	0,6701
01.37	103	5,8	0,058	0,942	11,3	0,6554	10,6446	0,3299	0,6701
01.40	102	5,9	0,059	0,941	11,2	0,6608	10,5392	0,3339	0,6661
01.43	101	5,9	0,059	0,941	11,1	0,6549	10,4451	0,3339	0,6661
01.46	100	6	0,06	0,94	11	0,6600	10,34	0,3379	0,6621

Tabelul 4.63 Tabela de decompresiei OXY- HELIUM DIVING DECOMPRESSION completată cu caracteristicile amestecului din barocameră la fiecare adâncime (continuare)

TIMP [oră.min]	**H** [m]	**Ox** [%]	r_{Ox} [-]	r_{He} [-]	p_{am} [bara]	p_{Ox} [bara]	p_{He} [bara]	m_{Ox} [-]	m_{He} [-]
01.49	99	6	0,06	0,94	10,9	0,6540	10,246	0,3379	0,6621
01.52	98	6,1	0,061	0,939	10,8	0,6588	10,1412	0,3418	0,6582
01.55	97	6,1	0,061	0,939	10,7	0,6527	10,0473	0,3418	0,6582
01.58	96	6,2	0,062	0,938	10,6	0,6572	9,9428	0,3457	0,6543
02.01	95	6,2	0,062	0,938	10,5	0,6510	9,849	0,3457	0,6543
02.04	94	6,3	0,063	0,937	10,4	0,6552	9,7448	0,3496	0,6504
02.07	93	6,4	0,064	0,936	10,3	0,6592	9,6408	0,3534	0,6466
02.10	92	6,4	0,064	0,936	10,2	0,6528	9,5472	0,3534	0,6466
02.13	91	6,5	0,065	0,935	10,1	0,6565	9,4435	0,3572	0,6428
02.16	90	6,5	0,065	0,935	10	0,6500	9,35	0,3572	0,6428
02.19	89	6,6	0,066	0,934	9,9	0,6534	9,2466	0,3610	0,639
02.22	88	6,7	0,067	0,933	9,8	0,6566	9,1434	0,3647	0,6353
02.25	87	6,8	0,068	0,932	9,7	0,6596	9,0404	0,3684	0,6316
02.28	86	6,8	0,068	0,932	9,6	0,6528	8,9472	0,3684	0,6316
02.31	85	6,9	0,069	0,931	9,5	0,6555	8,8445	0,3720	0,628
02.34	84	7	0,07	0,93	9,4	0,6580	8,742	0,3757	0,6243
02.37	83	7	0,07	0,93	9,3	0,6510	8,649	0,3757	0,6243
02.40	82	7,1	0,071	0,929	9,2	0,6532	8,5468	0,3793	0,6207
02.43	81	7,2	0,072	0,928	9,1	0,6552	8,4448	0,3829	0,6171
02.46	80	7,3	0,073	0,927	9	0,6570	8,343	0,3863	0,6137
02.49	79	7,4	0,074	0,926	8,9	0,6586	8,2414	0,3898	0,6102
02.52	78	7,4	0,074	0,926	8,8	0,6512	8,1488	0,3898	0,6102
02.55	77	7,5	0,075	0,925	8,7	0,6525	8,0475	0,3933	0,6067
02.58	76	7,6	0,076	0,924	8,6	0,6536	7,9464	0,3967	0,6033
03.01	75	7,7	0,077	0,923	8,5	0,6545	7,8455	0,4001	0,5999
03.04	74	7,8	0,078	0,922	8,4	0,6552	7,7448	0,4034	0,5966
03.07	73	7,9	0,079	0,921	8,3	0,6557	7,6443	0,4068	0,5932
03.16	72	8	0,08	0,92	8,2	0,6560	7,544	0,4101	0,5899
03.26	71	8,1	0,081	0,919	8,1	0,6561	7,4439	0,4133	0,5867
03.36	70	8,2	0,082	0,918	8	0,6560	7,344	0,4166	0,5834
03.46	69	8,3	0,083	0,917	7,9	0,6557	7,2443	0,4199	0,5801
03.56	68	8,4	0,084	0,916	7,8	0,6552	7,1448	0,4230	0,577
04.06	67	8,5	0,085	0,915	7,7	0,6545	7,0455	0,4262	0,5738
04.16	66	8,6	0,086	0,914	7,6	0,6536	6,9464	0,4293	0,5707
04.26	65	8,7	0,087	0,913	7,5	0,6525	6,8475	0,4324	0,5676
04.36	64	8,8	0,088	0,912	7,4	0,6512	6,7488	0,4355	0,5645
04.46	63	9	0,09	0,91	7,3	0,6570	6,643	0,4416	0,5584
04.57	62	9,1	0,091	0,909	7,2	0,6552	6,5448	0,4446	0,5584
05.08	61	9,2	0,092	0,908	7,1	0,6532	6,4468	0,4476	0,5524
05.21	60	9,3	0,093	0,907	7	0,6510	6,349	0,4505	0,5495
05.39	59	9,5	0,095	0,905	6,9	0,6555	6,2445	0,4563	0,5437
05.58	58	9,6	0,096	0,904	6,8	0,6528	6,1472	0,4592	0,5408
06.17	57	9,8	0,098	0,902	6,7	0,6566	6,0434	0,4649	0,5351
06.37	56	9,9	0,099	0,901	6,6	0,6534	5,9466	0,4677	0,5323
06.57	55	10	0,1	0,9	6,5	0,6500	5,85	0,4705	0,5295
07.17	54	10,2	0,102	0,898	6,4	0,6528	5,7472	0,4759	0,5241
07.37	53	10,4	0,104	0,896	6,3	0,6552	5,6448	0,4813	0,5187
07.57	52	10,5	0,105	0,895	6,2	0,6510	5,549	0,4840	0,516
08.17	51	10,7	0,107	0,893	6,1	0,6527	5,4473	0,4893	0,5107
08.48	50	10,9	0,109	0,891	6	0,6540	5,346	0,4945	0,5055

Tabelul 4.63 Tabela de decompresiei OXY- HELIUM DIVING DECOMPRESSION completată cu caracteristicile amestecului din barocameră la fiecare adâncime (continuare)

TIMP [oră.min]	H [m]	Ox [%]	r_{Ox} [-]	r_{He} [-]	p_{am} [bara]	p_{Ox} [bara]	p_{He} [bara]	m_{Ox} [-]	m_{He} [-]
09.19	49	11,1	0,111	0,889	5,9	0,6549	5,2451	0,4996	0,5004
09.50	48	11,3	0,113	0,887	5,8	0,6554	5,1446	0,5046	0,4954
10.21	47	11,5	0,115	0,885	5,7	0,6555	5,0445	0,5096	0,4904
10.52	46	11,7	0,117	0,883	5,6	0,6552	4,9448	0,5144	0,4856
11.23	45	11,9	0,119	0,881	5,5	0,6545	4,8455	0,5192	0,4808
11.54	44	12,1	0,121	0,879	5,4	0,6534	4,7466	0,5240	0,476
12.25	43	12,3	0,123	0,877	5,3	0,6519	4,6481	0,5286	0,4714
12.56	42	12,5	0,125	0,875	5,2	0,6500	4,55	0,5332	0,4668
13.27	41	12,8	0,128	0,872	5,1	0,6528	4,4472	0,5400	0,46
13.59	40	13	0,13	0,87	5	0,6500	4,35	0,5444	0,4556
14.31	39	13,3	0,133	0,867	4,9	0,6517	4,2483	0,5509	0,4491
15.03	38	13,6	0,136	0,864	4,8	0,6528	4,1472	0,5572	0,4428
15.35	37	13,9	0,139	0,861	4,7	0,6533	4,0467	0,5635	0,4365
16.07	36	14,2	0,142	0,858	4,6	0,6532	3,9468	0,5696	0,4304
16.39	35	14,5	0,145	0,855	4,5	0,6525	3,8475	0,5756	0,4244
17.11	34	14,8	0,148	0,852	4,4	0,6512	3,7488	0,5814	0,4186
17.43	33	15,2	0,152	0,848	4,3	0,6536	3,6464	0,5890	0,411
18.15	32	15,5	0,155	0,845	4,2	0,6510	3,549	0,5946	0,4054
18.47	31	15,9	0,159	0,841	4,1	0,6519	3,4481	0,6019	0,3981
19.19	30	16,3	0,163	0,837	4	0,6520	3,348	0,6089	0,3911
19.52	29	16,7	0,167	0,833	3,9	0,6513	3,2487	0,6158	0,3842
20.24	28	17,2	0,172	0,828	3,8	0,6536	3,1464	0,6242	0,3758
20.56	27	17,6	0,176	0,824	3,7	0,6512	3,0488	0,6307	0,3693
21.28	26	18,1	0,181	0,819	3,6	0,6516	2,9484	0,6386	0,3614
22.00	25	18,6	0,186	0,814	3,5	0,6510	2,849	0,6463	0,3537
22.32	24	19,2	0,192	0,808	3,4	0,6528	2,7472	0,6552	0,3448
23.04	23	19,7	0,197	0,803	3,3	0,6501	2,6499	0,6623	0,3377
23.37	22	20,4	0,204	0,796	3,2	0,6528	2,5472	0,6720	0,328
24.10	21	21	0,21	0,79	3,1	0,6510	2,449	0,6800	0,32
24.43	20	21,7	0,217	0,783	3	0,6510	2,349	0,6890	0,311
25.16	19	22,5	0,225	0,775	2,9	0,6525	2,2475	0,6989	0,3011
25.49	18	23,3	0,233	0,777	2,8	0,6524	2,1476	0,7084	0,2916
26.22	17	24,1	0,241	0,759	2,7	0,6507	2,0493	0,7174	0,2826
26.56	16	25	0,25	0,75	2,6	0,6500	1,95	0,7272	0,2728
27.31	15	25	0,25	0,75	2,5	0,6250	1,875	0,7272	0,2728
28.07	14	25	0,25	0,75	2,4	0,6000	1,8	0,7272	0,2728
28.44	13	25	0,25	0,75	2,3	0,5750	1,725	0,7272	0,2728
29.22	12	25	0,25	0,75	2,2	0,5500	1,65	0,7272	0,2728
30.01	11	25	0,25	0,75	2,1	0,5250	1,575	0,7272	0,2728
30.41	10	25	0,25	0,75	2	0,5000	1,5	0,7272	0,2728
31.22	9	25	0,25	0,75	1,9	0,4750	1,425	0,7272	0,2728
32.04	8	25	0,25	0,75	1,8	0,4500	1,35	0,7272	0,2728
32.47	7	25	0,25	0,75	1,7	0,4250	1,275	0,7272	0,2728
33.31	6	25	0,25	0,75	1,6	0,4000	1,2	0,7272	0,2728
34.16	5	25	0,25	0,75	1,5	0,3750	1,125	0,7272	0,2728
35.02	4	25	0,25	0,75	1,4	0,3500	1,05	0,7272	0,2728
35.49	3	25	0,25	0,75	1,3	0,3250	0,975	0,7272	0,2728
36.37	2	25	0,25	0,75	1,2	0,3000	0,9	0,7272	0,2728
37.26	1	25	0,25	0,75	1,1	0,2750	0,825	0,7272	0,2728
38.16	0	25	0,25	0,75	1	0,2500	0,75	0,7272	0,2728

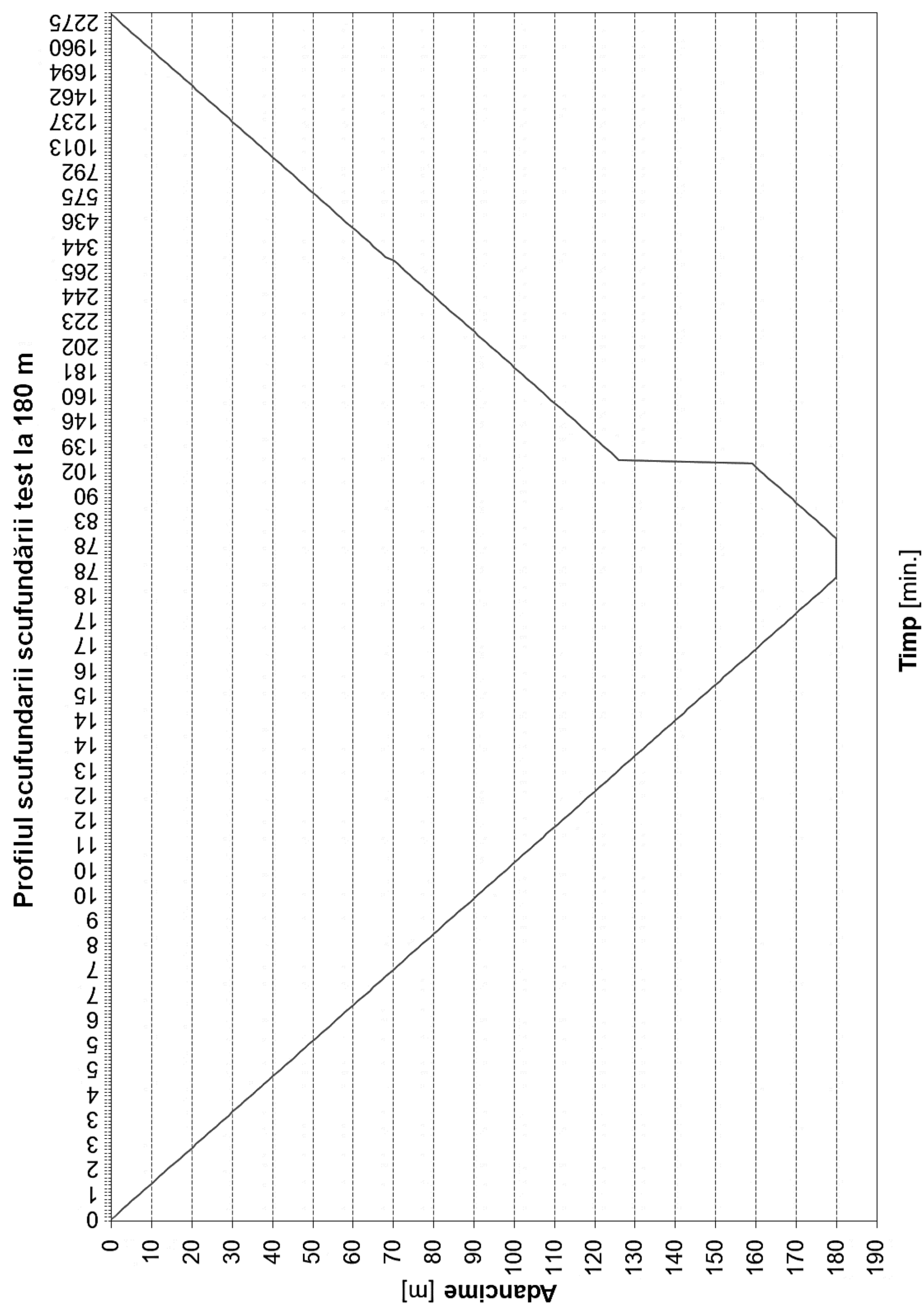


Figura 4.14 Profilul scufundării test la 180 m conform PSS-BV

4.4 MODELUL MATEMATIC PENTRU DESCRIEREA PROCESELOR HIPERBARE AFERENTE UNEI SCUFUNDĂRI DE SISTEM, UNITARE, LA ADÂNCIMEA DE 180 M, CU VIDAREA INIȚIALĂ A BAROCAMEREI (MMSS-BV)

În acest paragraf, se prezintă un al doilea model matematic original, care se referă la descrierea proceselor hiperbare ce au loc în cadrul unei scufundări de sistem, unitare, la adâncimea de 180 m, la care presurizarea barocamerei se realizează cu amestec binar HELIOX 5/95 (5%Ox, 95%He), după ce, inițial, barocamera a fost vidată (presiune 0 abs.).

Acest model, urmărește să descrie matematic planul scufundării de sistem la adâncimea de 180 m prezentat în paragraful 4.3, pentru ca apoi, ulterior, să fie validat de testul experimental al planului scufundării reale de sistem.

Acest model matematic, numit pe scurt **Modelul Matematic pentru Scufundare de Sistem cu Barocameră Vidată (MMSS-BV)**, urmărește vidarea inițială a barocamerei pentru ca apoi să fie presurizată cu amestec binar HELIOX 5/95 în faza de compresie a scafandrilor și menținerea presiunii parțiale a oxigenului, în faza de decompresie, constantă și egală cu 650 mbar (abs.).

Prin vidarea inițială a barocamerei, atât în timpul compresiei cât și al decompresiei, în interiorul acesteia, se menține un amestec binar HELIOX (heliu și oxigen).

Acest Model Matematic al Scufundării de Sistem pentru cazul Barocamerei Vidate (MMSS-BV), cuprinde două faze și anume (schema 4.2):

- Faza de Compresie a scafandrilor prin presurizarea barocamerei, pentru cazul Barocamerei Vidate (FC-BV);
- Faza de Decompresie a scafandrilor prin depresurizarea barocamerei, pentru cazul Barocamerei Vidate (FD-BV).

Schema 4.2 Schema Modelului Matematic al Scufundării de Sistem pentru cazul cu Barocameră Vidată (**MMSS-BV**) cu fazele și etapele de calcul

MMSS- BV				
FC-BV		**FD-BV**		**EF-BV**
GEC1-BV	GEC2-BV	GED1-BV	GED2-BV	
3 etape	15 etape	6 etape	18 etape	1 etapă

La rândul ei, faza **FC-BV** este compusă din două grupuri de etape de compresie de calcul și anume:

- **Grupul de Etape de Compresie 1 pentru cazul Barocamerei Vidate (GEC1-BV)**, corespunzător etapelor de compresie la care, presiunea parțială a oxigenului din amestecul de gaze existent în barocameră fiind sub nivelul normoxiei (200 mbar abs.), scafandrii respiră amestec gazos normoxic la mască (de obicei, aer);

- **Grupul de Etape de Compresie 2 pentru cazul Barocamerei Vidate (GEC2-BV)**, corespunzător etapelor de compresie de la care scafandrii pot respira amestecul de gaze existent în barocameră, GEC2-BV având, ca final atingerea adâncimii de 180 m numită Nivel de Viață (NV).

Pentru calculul presiunii parțiale ale componentelor amestecului se folosesc relațiile:

$$p_i = r_i \cdot p_{am}$$

în care: p_i este presiunea parțială a componentului *i* [N/m^2], r_i - participația volumică a componentului *i* [-], p_{am} - presiunea amestecului [N/m^2].

Participațiile masice ale componentelor amestecului se calculează cu:

$$m_i = \frac{\frac{r_i}{R_i}}{R_{am}}$$

în care: m_i este participația masică a componentului *i* [-], r_i - participația volumică a componentului i [-], R_i - constanta caracteristică a gazului i [J/kgK], R_{am} - constanta amestecului [J/kgK].

4.4.1 Faza compresiei scafandrilor pentru modelul „cu barocameră vidată” (FC-BV)

Faza de Compresie a Scafandrilor, pentru cazul Barocamerei Vidate (FC-BV), este alcătuită de două grupuri de etape și anume **Grupul de Etape de Compresie 1 (GEC1-BV) și Grupul de Etape de Compresie 2 (GEC2-BV).**

Prezentarea relațiilor de calcul pentru participațiile masice, participațiile volumice și presiunile parțiale ale celor două componente He și Ox.

$$m_{C1Ox} = \frac{\frac{r_{C1Ox}}{R_{Ox}}}{R_{HeOx}}$$

$$m_{C1He} = \frac{\frac{r_{C1He}}{R_{He}}}{R_{HeOx}}$$

$$r_{C1Ox} = m_{Ox} \frac{R_{Ox}}{R_{HeOx}}$$

$$r_{C1He} = m_{He} \frac{R_{He}}{R_{HeOx}}$$

$$p_{C1Ox} = r_{C1Ox} \cdot p_{C1HeOx}$$

$$p_{C1He} = r_{C1He} \cdot p_{C1HeOx}$$

în care: $m_{C1Ox,He}$ este participația masică a oxigenului, respectiv a heliului pentru grupul de etape C_1 [-], $r_{C1Ox,He}$ - participația volumică a oxigenului, respectiv a heliului pentru grupul de etape C_1 [-], $R_{Ox,He}$ - constanta caracteristică a oxigenului și a heliului [J/kgK], R_{HeOx} - constanta amestecului HELIOX [J/kgK], $p_{C1Ox,He}$ - presiunea parțială a oxigenului, respectiv a heliului pentru grupul de etape C_1 [N/m^2], p_{HeOx} - presiunea amestecului binar HELIOX [N/m^2].

4.4.1.1 Grupul de etape de compresie 1 (GEC1-BV)

Grupul de Etape de Compresie 1 (GEC1-BV) este alcătuit din trei etape de calcul (C_1-C_2, C_2-C_3, C_3-C_4), care realizează legătura între cele 4 stări aparținând grupului de etape GEC1 - BV (C_1, C_2, C_3, C_4). Toate cele trei etape ale GEC1 - BV se referă la presurizarea barocamerei cu amestec HELIOX 5/95 (5% Ox, 95% He) de la nivelul vidului din barocameră (aproximativ 0 (abs.)) până la nivelul presiunii la care se atinge valoarea normooxică pentru presiunea parțială a oxigenului. Când, prin presurizare, se atinge presiunea atmosferică, scafandrii intră în barocameră și respiră aer la mască până când presiunea parțială a oxigenului din amestecul HELIOX din barocameră, atinge valoarea normonxică (200 mbar (abs.)). Această presiune parțială a oxigenului se întâlnește la adâncimea de 30 m, respectiv la presiunea din barocameră de 4 bara.

Acest prim grup de etape de calcul (GEC1-BV) are ca stare inițială starea C_1 care este starea la care presiunea este presiunea atmosferică (1 bara) cu amestec HELIOX 5/95 și la care scafandrii pătrund în barocameră și este caracterizată prin presiunea totală $p_{C1,am}$ = 1 bara, prin adâncimea echivalentă H_{C1} = 0 m și prin presiunea parțială a oxigenului $p_{C1,Ox}$ = 0,05 bara = 50 mbar (abs.), (presiune parțială a oxigenului hipoxică), și ca stare finală starea C_4 de la care scafandrii pot respira direct amestecul din barocameră, caracterizată prin $p_{C4,am}$ = 4 bara, H_{C4} = 30 m și $p_{C4,Ox}$ = 0,2 bara = 200 mbar (abs.).

Corespunzător grupului de etape GEC1-BV, în tabelele 4.64, 4.65, 4.66, 4.67 sunt prezentate valorile presiunilor parțiale ($p_{Cn,Ox}$, $p_{Cn,He}$), participațiilor masice ($m_{Cn,Ox}$, $m_{Cn,He}$), participațiilor volumice ($r_{Cn,Ox}$, $r_{Cn,He}$), presiunii amestecului din barocameră ($p_{Cn,am}$) și adâncimii echivalente (H_{Cn}) pentru cele

n = 1,2,3,4 stări aferente grupului de etape GEC1-BV din faza de compresie FC-BV.

Grupul de Etape de Compresie 1 (GEC1 - BV)

Tabelul 4.64 Starea C_1 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C1am} = 1 bara		
H_{C1} = 0 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{C1Ox} [bara]	p_{C1He} [bara]
C1	0,05	0,95
Participația masică		
Stare	m_{C1Ox} [-]	m_{C1He} [-]
C1	0,2963	0,7037
Participația volumică		
Stare	r_{C1Ox} [-]	r_{C1He} [-]
C1	0,0500	0,9500

Tabelul 4.65 Starea C_2 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C2am} = 2 bara		
H_{C2} = 10 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{C2Ox} [bara]	p_{C2He} [bara]
C_2	0,10	1,90
Participația masică		
Stare	m_{C2Ox} [-]	m_{C2He} [-]
C_2	0,2963	0,7037
Participația volumică		
Stare	r_{C2Ox} [-]	r_{C2He} [-]
C_2	0,0500	0,9500

Tabelul 4.66 Starea C_3 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C3am} = 3 bara		
H_{C3} = 20 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{C3Ox} [bara]	p_{C3He} [bara]
C_3	0,15	2,85
Participația masică		
Stare	m_{C3Ox} [-]	m_{C3He} [-]
C_3	0,2963	0,7037
Participația volumică		
Stare	r_{C3Ox} [-]	r_{C3He} [-]
C_3	0,0500	0,9500

Tabelul 4.67 Starea C_4 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C4am} = 4 bara		
H_{C4} = 30 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{C4Ox} [bara]	p_{C4He} [bara]
C_4	0,20	3,80
Participația masică		
Stare	m_{C4Ox} [-]	m_{C4He} [-]
C_4	0,2963	0,7037
Participația volumică		
Stare	r_{C4Ox} [-]	r_{C4He} [-]
C_4	0,0500	0,9500

4.4.1.2 Grupul de etape de compresie 2 (GEC2-BV)

Grupul de Etape de Compresie 2 (GEC2-BV) este alcătuit din 15 etape de calcul (C_4-C_5, C_5-C_6,..., C_{18}-C_{19}), care realizează legătura între cele 16 stări aparținând grupului de etape GEC2-BV se referă la comprimarea scafandrilor prin presurizarea barocamerei cu amestec binar HELIOX 5/95 (5% Ox, 95% He), de la nivelul presiunii din barocameră de la care scafandrii pot renunța la mască și pot respira direct amestecul din barocameră, la Nivelul de Viață (NV) corespunzător adâncimii de 180 m.

Acest al doilea grup de etape de calcul (GEC2-BV), are ca stare inițială starea C_4 care este starea la care presiunea parțială a oxigenului atinge valoarea de 200 mbar (abs.), caracterizată prin $p_{C4,am}$ = 4 bara, H_{C4} = 30 m și $p_{C4,Ox}$ = 0,2 bara = 200 mbar (abs.) și ca stare finală starea C_{19}, corespunzătoare nivelului de viață (NV), caracterizată prin $p_{C19,am}$ = 19 bara, H_{C19} = 180 m și $p_{C19,Ox}$ = 0,95 bara = 950 mbar (abs.).

Corespunzător grupului de etape GEC2-BV, în tabelele 4.68, 4.69,... 4.83 sunt prezentate valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice, participațiilor volumice ale componentelor amestecului (Ox, He), presiunii amestecului din barocameră și adâncimii echivalente pentru cele 16 stări aferente grupului de etape GEC2-BV din faza de compresie FC-BV.

Grupul de Etape de Compresie 2 (GEC2 - BV)

Tabelul 4.68 Starea C4 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C4am} = 4 bara		
H_{C4} = 30 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{C4Ox} [bara]	p_{C4He} [bara]
C_4	0,20	3,80
Participația masică		
Stare	m_{C4Ox} [-]	m_{C4He} [-]
C_4	0,2963	0,7037
Participația volumică		
Stare	r_{C4Ox} [-]	r_{C4He} [-]
C_4	0,0500	0,9500

Tabelul 4.69 Starea C_5 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C5am} = 5 bara		
H_{C5} = 40 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{C5Ox} [bara]	p_{C5He} [bara]
C_5	0,25	4,75
Participația masică		
Stare	m_{C5Ox} [-]	m_{C5He} [-]
C_5	0,2963	0,7037
Participația volumică		
Stare	r_{C5Ox} [-]	r_{C5He} [-]
C_5	0,0500	0,9500

Tabelul 4.70 Starea C_6 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C6am} = 6 bara		
H_{C6} = 50 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{C6Ox} [bara]	p_{C6He} [bara]
C_6	0,30	5,70
Participația masică		
Stare	m_{C6Ox} [-]	m_{C6He} [-]
C_6	0,2963	0,7037
Participația volumică		
Stare	r_{C6Ox} [-]	r_{C6He} [-]
C_6	0,0500	0,9500

Tabelul 4.71 Starea C_7 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C7am} = 7 bara		
H_{C7} = 60 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{C7Ox} [bara]	p_{C7He} [bara]
C_7	0,35	6,65
Participația masică		
Stare	m_{C7Ox} [-]	m_{C7He} [-]
C_7	0,2963	0,7037
Participația volumică		
Stare	r_{C7Ox} [-]	r_{C7He} [-]
C_7	0,0500	0,9500

Tabelul 4.72 Starea C_8 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C8am} = 8 bara		
H_{C8} = 70 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{C8Ox} [bara]	p_{C8He} [bara]
C_8	0,40	7,60
Participația masică		
Stare	m_{C8Ox} [-]	m_{C8He} [-]
C_8	0,2963	0,7037
Participația volumică		
Stare	r_{C8Ox} [-]	r_{C8He} [-]
C_8	0,0500	0,9500

Tabelul 4.73 Starea C_9 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C9am} = 9 bara		
H_{C9} = 80 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{C9Ox} [bara]	p_{C9He} [bara]
C_9	0,45	8,55
Participația masică		
Stare	m_{C9Ox} [-]	m_{C9He} [-]
C_9	0,2963	0,7037
Participația volumică		
Stare	r_{C9Ox} [-]	r_{C9He} [-]
C_9	0,0500	0,9500

Tabelul 4.74 Starea C_{10} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C10am} = 10 bara		
H_{C10} = 90 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{C10Ox} [bara]	p_{C10He} [bara]
C_{10}	0,50	9,50
Participația masică		
Stare	m_{C10Ox} [-]	m_{C10He} [-]
C_{10}	0,2963	0,7037
Participația volumică		
Stare	r_{C10Ox} [-]	r_{C10He} [-]
C_{10}	0,0500	0,9500

Tabelul 4.75 Starea C_{11} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C11am} = 11 bara		
H_{C11} = 100 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{C11Ox} [bara]	p_{C11He} [bara]
C_{11}	0,55	10,45
Participația masică		
Stare	m_{C11Ox} [-]	m_{C11He} [-]
C_{11}	0,2963	0,7037
Participația volumică		
Stare	r_{C11Ox} [-]	r_{C11He} [-]
C_{11}	0,0500	0,9500

Tabelul 4.76 Starea C_{12} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C12am} = 12 bara		
H_{C12} = 110 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{C12Ox} [bara]	p_{C12He} [bara]
C_{12}	0,60	11,40
Participația masică		
Stare	m_{C12Ox} [-]	m_{C12He} [-]
C_{12}	0,2963	0,7037
Participația volumică		
Stare	r_{C12Ox} [-]	r_{C12He} [-]
C_{12}	0,0500	0,9500

Tabelul 4.77 Starea C_{13} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C13am} = 13 bara		
H_{C13} = 120 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{C13Ox} [bara]	p_{C13He} [bara]
C_{13}	0,65	12,35
Participația masică		
Stare	m_{C13Ox} [-]	m_{C13He} [-]
C_{13}	0,2963	0,7037
Participația volumică		
Stare	r_{C13Ox} [-]	r_{C13He} [-]
C_{13}	0,0500	0,9500

Tabelul 4.78 Starea C_{14} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C14am} = 14 bara		
H_{C14} = 130 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{C14Ox} [bara]	p_{C14He} [bara]
C_{14}	0,70	13,30
Participația masică		
Stare	m_{C14Ox} [-]	m_{C14He} [-]
C_{14}	0,2963	0,7037
Participația volumică		
Stare	r_{C14Ox} [-]	r_{C14He} [-]
C_{14}	0,0500	0,9500

Tabelul 4.79 Starea C_{15} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C15am} = 15 bara		
H_{C15} = 140 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{C15Ox} [bara]	p_{C15He} [bara]
C_{15}	0,75	14,25
Participația masică		
Stare	m_{C15Ox} [-]	m_{C15He} [-]
C_{15}	0,2963	0,7037
Participația volumică		
Stare	r_{C15Ox} [-]	r_{C15He} [-]
C_{15}	0,0500	0,9500

Tabelul 4.80 Starea C_{16} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C16am} = 16 bara		
H_{C16} = 150 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{C16Ox} [bara]	p_{C16He} [bara]
C_{16}	0,80	15,20
Participația masică		
Stare	m_{C16Ox} [-]	m_{C16He} [-]
C_{16}	0,2963	0,7037
Participația volumică		
Stare	r_{C16Ox} [-]	r_{C16He} [-]
C_{16}	0,0500	0,9500

Tabelul 4.81 Starea C_{17} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C17am} = 17 bara		
H_{C17} = 160 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{C17Ox} [bara]	p_{C17He} [bara]
C_{17}	0,85	16,15
Participația masică		
Stare	m_{C17Ox} [-]	m_{C17He} [-]
C_{17}	0,2963	0,7037
Participația volumică		
Stare	r_{C17Ox} [-]	r_{C17He} [-]
C_{17}	0,0500	0,9500

Tabelul 4.82 Starea C_{18} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C18am} = 18 bara		
H_{C18} = 170 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{C18Ox} [bara]	p_{C18He} [bara]
C_{18}	0,90	17,10
Participația masică		
Stare	m_{C18Ox} [-]	m_{C18He} [-]
C_{18}	0,2963	0,7037
Participația volumică		
Stare	r_{C18Ox} [-]	r_{C18He} [-]
C_{18}	0,0500	0,9500

Tabelul 4.83 Starea C_{19} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{C19am} = 19 bara		
H_{C19} = 180 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{C19Ox} [bara]	p_{C19He} [bara]
C_{19}	0,95	18,05
Participația masică		
Stare	m_{C19Ox} [-]	m_{C19He} [-]
C_{19}	0,2963	0,7037
Participația volumică		
Stare	r_{C19Ox} [-]	r_{C19He} [-]
C_{19}	0,0500	0,9500

Variația presiunilor parțiale ale componentelor amestecului binar cu adâncimea de scufundare, în faza de compresie FC-BV, obținute cu modelul matematic MMSS-BV și prezentate în tabelele 4.68,....4.83, este reprezentată grafic în figura 4.15.

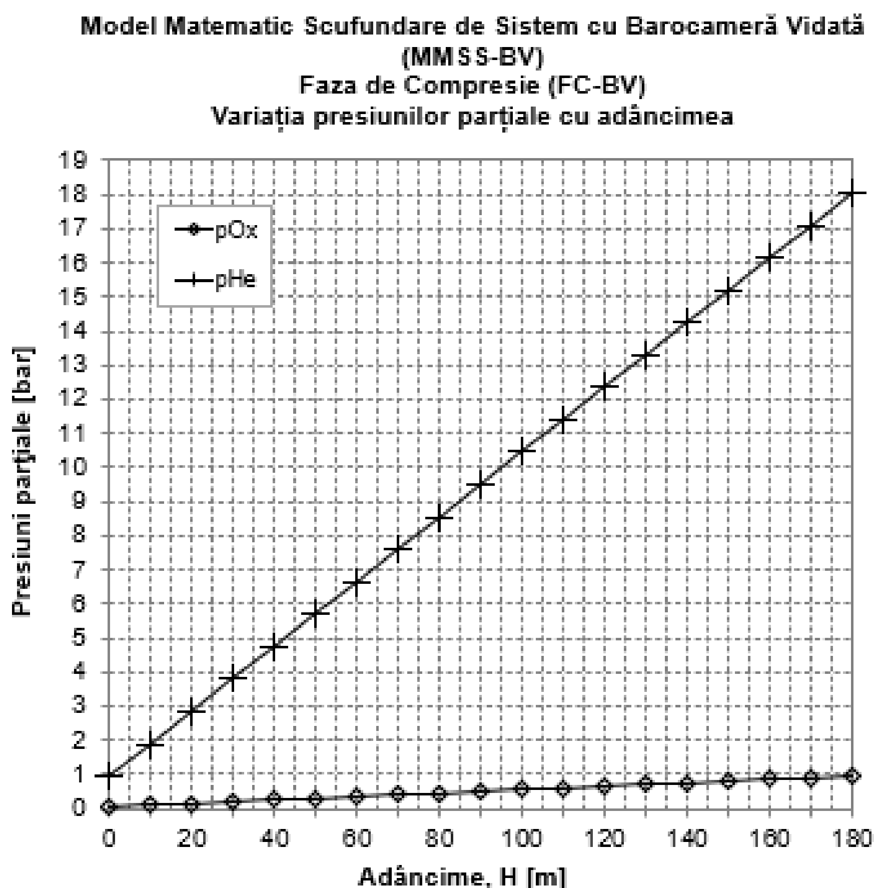


Figura 4.15 Variația presiunilor parțiale ale componentelor amestecului binar din barocameră, cu adâncimea, în faza de compresie, FC-BV

Variația participațiilor masice ale componentelor amestecului binar cu adâncimea de scufundare, în faza de compresie FC-BV, obținute cu modelul MMSS-BV și prezentate în tabelele 4.68,....4.83, este reprezentată grafic în figura 4.16.

Variația participațiilor volumice ale componentelor amestecului binar din barocameră cu adâncimea de scufundare, în faza de compresie FC-BV, obținute cu modelul MMSS-BV și prezentate în tabelele 4.68....4.83, este reprezentată grafic în figura 4.17.

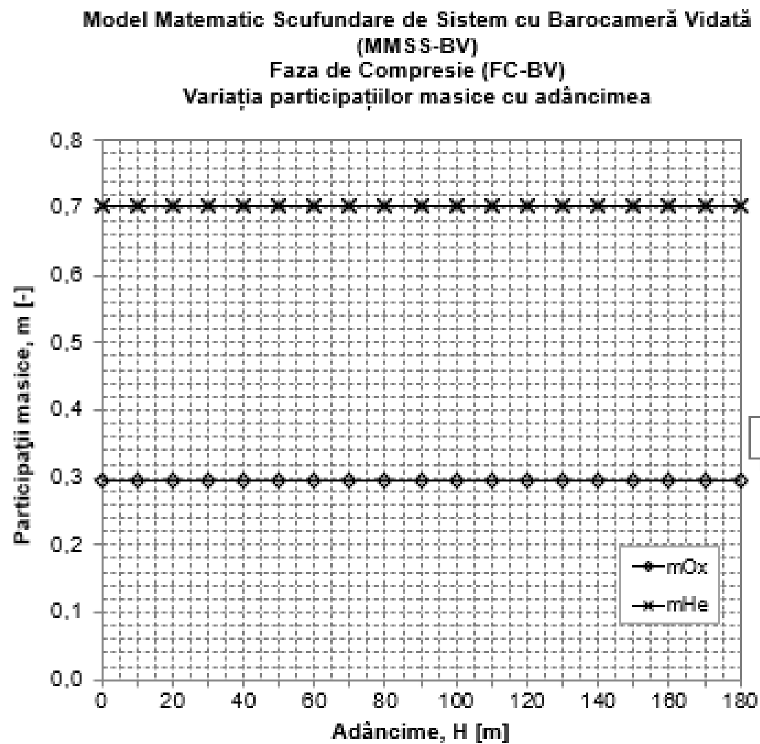


Figura 4.16 Variația participațiilor masice ale componentelor amestecului binar din barocameră, cu adâncimea, în faza de compresie, FC-BV

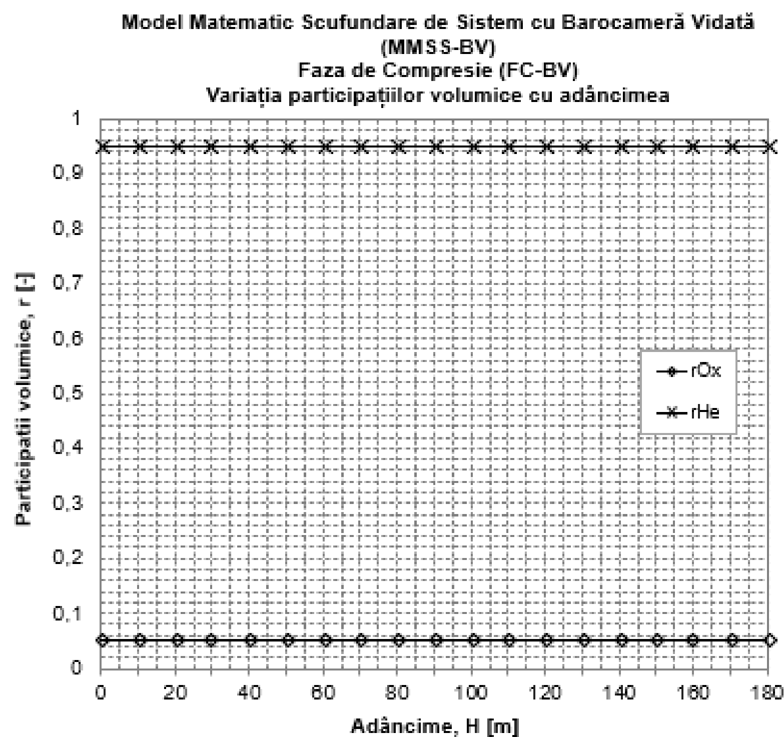


Figura 4.17 Variația participațiilor volumice ale componentelor amestecului binar din barocameră, cu adâncimea, în faza de compresie, FC-BV

4.4.2 Faza decompresiei scafandrilor pentru modelul „cu barocameră vidată” (FD-BV)

Faza de Decompresie a Scafandrilor pentru cazul Barocamerei Vidate (FD-BV), este alcătuită din Grupul de Etape de Decompresie 1 (GED1-BV), Grupul de Etape de Decompresie 2 (GED2-BV) și Etapa Finală de Decompresie (EFD-BV).

4.4.2.1 Grupul de etape de decompresie 1 (GED1 - BV)

Grupul de Etape de Decompresie 1 (GED1-BV) este alcătuit din șase etape de calcul (D_1-D_2, D_2-D_3,...,D_6-D_7), care realizează legătura între cele șapte stări aparținând grupului de etape GED1-BV (D_1, D_2,..., D_7).

Toate cele șase etape de calcul ale GED1-BV se referă la decompresia scafandrilor prin depresurizarea barocamerei, participațiile volumice ale celor două componente ale amestecului de gaze (Ox, He), rămânând constante.

Acest prim grup de etape de decompresie (GED1-BV), are ca stare inițială strea D_1, identică cu starea finală C_{19} din faza de compresie (GEC2-BV), numită și Nivel de Viață (NV), stare caracterizată prin $p_{D1,am} = p_{C19,am}$ = 19 bara, $H_{D1} = H_{C19}$= 180 m și $p_{D1,Ox} = p_{C19,Ox}$ = 0,95 bara = 950 mbar (abs.) și ca stare finală starea D_7, caracterizată prin $p_{D7,am}$ = 13 bara, H_{D7} = 120 m și $p_{D7,Ox}$ = 0,65 bara = 650 mbar (abs.). La această ultimă stare D_7 din GED1-BV se atinge, prin decompresie, presiunea parțială a oxigenului dorită, de 650 mbar (abs.) ce va trebui menținută constantă în continuarea decompresiei.

Relațiile generale de calcul pentru mărimile caracteristice ale stărilor D_1, D_2,...., D_7 aferente grupului de etape GED1-BV, sunt prezentate în cele ce urmează:

Relațiile generale de calcul pentru Grupul de Etape de Decompresie GED1-BV:

$$p_{D1Ox} = r_{D1Ox} \cdot p_{D1HeOx}$$

$$p_{D1He} = r_{D1He} \cdot p_{D1HeOx}$$

$$m_{D1Ox} = \frac{r_{D1Ox} \frac{R_{Ox}}{R_{HeOx}}}{}$$

$$m_{D1He} = \frac{r_{D1He} \frac{R_{He}}{R_{HeOx}}}{}$$

$$r_{D1Ox} = m_{D1Ox} \frac{R_{HeOx}}{R_{Ox}}$$

$$r_{D1He} = m_{D1He} \frac{R_{HeOx}}{R_{He}}$$

în care: $p_{D1Ox,He}$ este presiunea parțială a oxigenului respectiv a heliului pentru grupul de etape D_1 [N/m^2], p_{HeOx} - presiunea amestecului binar HELIOX [N/m^2], $m_{D1Ox,He}$ - participația masică a oxigenului, respectiv a heliului pentru grupul de etape D_1 [-], $r_{D1Ox,He}$ - participația volumică a oxigenului, respectiv a heliului pentru grupul de etape D_1 [-], $R_{Ox,He}$ - constanta caracteristică a oxigenului și a heliului [J/kgK], R_{HeOx} - constanta amestecului HELIOX [J/kgK].

Corespunzător grupului de etape GED1-BV, în tabelele 4.84, 4.85,...,4.90 sunt prezentate valorile presiunilor parțiale ($p_{Dn,Ox}$, $p_{Dn,He}$), participațiilor masice ($m_{Dn,Ox}$, $m_{Dn,He}$), participațiilor volumice ($r_{Dn,Ox}$, $r_{Dn,He}$) ale componentelor amestecului de gaze, presiunii amestecului din barocameră ($p_{Dn,am}$) și adâncimii echivalente (H_{Dn}) pentru cele n = 1,2,...,7 stări aferente fazei de decompresie FD-BV și grupului de etape GED1-BV.

Tabelul 4.84 Starea D_1 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D1am} = p_{C19am}$ = 19 bara		
$H_{D1} = H_{C19}$ = = 180 m		
Presiunea parțială		
Stare	$p_{D1Ox} = p_{C19Ox}$ [bara]	pD1He = pC19He [bara]
$D_1 \equiv C_{19}$	0,95	18,05
Participația masică		
Stare	$m_{D1Ox} = m_{C19Ox}$ [-]	$m_{D1He} = m_{C19He}$ [-]
$D_1 \equiv C_{19}$	0,2963	0,7037
Participația volumică		
Stare	$r_{D1Ox} = r_{C19Ox}$ [-]	$r_{D1He} = r_{C19He}$ [-]
$D_1 \equiv C_{19}$	0,0500	0,9500

Tabelul 4.85 Starea D_2 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D2am} = 18 bara		
H_{D2} = 170 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{D2Ox} [bara]	p_{D2He} [bara]
D_2	0,90	17,10
Participația masică		
Stare	m_{D2Ox} [-]	m_{D2He} [-]
D_2	0,2963	0,7037
Participația volumică		
Stare	r_{D2Ox} [-]	r_{D2He} [-]
D_2	0,0500	0,9500

Tabelul 4.86 Starea D_3 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D3am} = 17 bara		
H_{D3} = 160 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{D3Ox} [bara]	p_{D3He} [bara]
D_3	p_{D3Ox} [bara]	p_{D3He} [bara]
Participația masică		
Stare	m_{D3Ox} [-]	m_{D3He} [-]
D_3	0,2963	0,7037
Participația volumică		
Stare	r_{D3Ox} [-]	r_{D3He} [-]
D_3	0,0500	0,9500

Tabelul 4.87 Starea D_4 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D4am} = 16 bara		
H_{D4} = 150 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{D4Ox} [bara]	p_{D4He} [bara]
D_4	0,80	15,20
Participația masică		
Stare	m_{D4Ox} [-]	m_{D4He} [-]
D_4	0,2963	0,7037
Participația volumică		
Stare	r_{D4Ox} [-]	r_{D4He} [-]
D_4	0,0500	0,9500

Tabelul 4.88 Starea D_5 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D5am} = 15 bara		
H_{D5} = 140 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{D5Ox} [bara]	p_{D5He} [bara]
D_5	0,75	14,25
Participația masică		
Stare	m_{D5Ox} [-]	m_{D5He} [-]
D_5	0,2963	0,7037
Participația volumică		
Stare	r_{D5Ox} [-]	r_{D5He} [-]
D_5	0,0500	0,9500

Tabelul 4.89 Starea D_6 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D6am} = 14 bara		
H_{D6} = 130 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{D6Ox} [bara]	p_{D6He} [bara]
D_6	0,70	13,30
Participația masică		
Stare	m_{D6Ox} [-]	m_{D6He} [-]
D_6	0,2963	0,7037
Participația volumică		
Stare	r_{D6Ox} [-]	r_{D6He} [-]
D_6	0,0500	0,9500

Tabelul 4.90 Starea D_7 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D7am} = 13 bara		
H_{D7} = 120 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{D7Ox} [bara]	p_{D7He} [bara]
D_7	0,65	12,35
Participația masică		
Stare	m_{D7Ox} [-]	m_{D7He} [-]
D_7	0,2963	0,7037
Participația volumică		
Stare	r_{D7Ox} [-]	r_{D7He} [-]
D_7	0,0500	0,9500

4.4.2.2 Grupul de etape de decompresie 2 (GED2-BV)

Relațiile de calcul pentru mărimile caracteristice ale stărilor D_7, D_8,..., D_{25} aferente grupului de etape GED2-BV, sunt prezentate în cele ce urmează:

$$p_{DHeOx} = p_{D2Ox} + p_{D2He}$$

$$r_{D2Ox} = m_{D2Ox} \frac{R_{HeOx}}{R_{Ox}}$$

$$r_{D2He} = m_{D2He} \frac{R_{HeOx}}{R_{He}}$$

$$m_{D2Ox} = \frac{\frac{r_{D2Ox}}{R_{Ox}}}{R_{HeOx}}$$

$$m_{D2He} = \frac{\frac{r_{D2He}}{R_{He}}}{R_{HeOx}}$$

$$p_{D_2^{'}Ox} = r_{D_2^{'}Ox} \cdot p_{D_2^{'}HeOx}$$

$$p_{D_2^{'}He} = r_{D_2^{'}He} \cdot p_{D_2^{'}HeOx}$$

$$r_{D2Ox}^{'} = r_{D2Ox} = m_{D2Ox} \frac{R_{HeOx}}{R_{Ox}}$$

$$r_{D2He}^{'} = r_{D2He} = m_{D2He} \frac{R_{HeOx}}{R_{He}}$$

$$m_{D2Ox}^{'} = m_{D2Ox} = \frac{r_{D2Ox}}{\frac{R_{Ox}}{R_{HeOx}}}$$

$$m_{D2He}^{'} = m_{D2He} = \frac{r_{D2He}}{\frac{R_{He}}{R_{HeOx}}}$$

în care: $p_{D2Ox,He}$ este presiunea parțială a oxigenului respectiv a heliului pentru grupul de etape D_2 [N/m^2], $p'_{D2Ox,He}$ - presiunea parțială a oxigenului respectiv a heliului pentru grupul de subetape D_2 [N/m^2], p_{HeOx} - presiunea amestecului binar HELIOX [N/m^2], $m_{D2Ox,He}$ - participația masică a oxigenului, respectiv a heliului pentru grupul de etape D_2 [-], $m'_{D2Ox,He}$ - participația masică a oxigenului, respectiv a heliului pentru grupul de subetape D_2 [-], $r_{D2Ox,He}$ - participația volumică a oxigenului, respectiv a heliului pentru grupul de etape D_2 [-], $r'_{D2Ox,He}$ - participația volumică a oxigenului, respectiv a heliului pentru grupul de subetape D_2 [-], R_{HeOx} - constanta amestecului binar HELIOX [J/kgK], $R_{Ox,He}$ - constanta caracteristică a oxigenului și a heliului [J/kgK].

Grupul de Etape de Decompresie 2 (GED2-BV) este alcătuit din 18 etape (D_7-D_8, D_8-D_9,...D_{24}-D_{25}) care realizează legătura între cele 19 stări aparținând grupului de etape GED2-BV (D_7, D_8,..., D_{25}).

Toate cele 18 etape de calcul ale GED2-BV se referă la decompresia scafandrilor urmărindu-se menținerea constantă a presiunii parțiale a oxigenului la valoarea de 650 mbar (abs.). Pentru aceasta, fiecare din cele 17 etape de calcul sunt alcătuite din câte două subetape de calcul.

În prima subetapă din cadrul unei etape de calcul, se decomprimă scafandri prin depresurizarea barocamerei cu o anumită scădere de presiune (ex. de circa 0,5 bar), prin aceasta menținându-se constante participațiile volumice ale celor două componente ale amestecului din barocameră (Ox, He), dar scăzându-se presiunea parțială a oxigenului sub 650 mbar (abs.).

În cea de-a doua subetapă din cadrul unei etape de calcul, se presurizează ușor cu oxigen pur până când presiunea parțială a oxigenului redevine de 650 mbar (abs.).

Starea inițială a grupului de etape GED2-BV este starea D_7 caracterizată prin $p_{D7,am}$ = 13 bara, H_{D7} = 120 m și $p_{D7,Ox}$ = 0,65 bara = 650 mbar (abs.), iar starea finală a grupului este D_{25} caracterizată prin $p_{D25,am}$ = 2,6294 bara, H_{D25} = 16,294 m și $p_{D25,Ox}$ = 0,65 bara = 650 mbar (abs.).

Corespunzător grupului de etape GED2-BV, în tabelele 4.91, 4.90,...4.126 sunt prezentate valorile presiunilor parțiale ($p_{Dn,Ox}$, $p_{Dn,He}$, $p_{Dn',Ox}$, $p_{Dn',He}$), participațiilor masice ($m_{Dn,Ox}$, $m_{Dn,He}$, $m_{Dn',Ox}$, $m_{Dn',He}$), participațiilor volumice ($r_{Dn,Ox}$, $r_{Dn,He}$, $r_{Dn',Ox}$, $r_{Dn',He}$), ale componentelor amestecului de gaze, presiunii amestecului din barocameră ($p_{Dn,am}$) și adâncimii echivalente (H_{Dn}) pentru cele n = 8, 8',9, 9',...,25 stări aferente fazei de decompresie FD-BV și grupului de etape GED2-BV.

Grupul de Etape de Decompresie 2 (GED2-BV)

Tabelul 4.91 Starea D_7 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D7am} = 13 bara		
H_{D7} = 120 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{D7Ox} [bara]	p_{D7He} [bara]
D_7	0,65	12,35
Participația masică		
Stare	m_{D7Ox} [-]	m_{D7He} [-]
D_7	0,2963	0,7037
Participația volumică		
Stare	r_{D7Ox} [-]	r_{D7He} [-]
D_7	0,0500	0,9500

Tabelul 4.92 Starea intermediară $D_{7'}$– Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D7'am}$ = 12,05 bara		
$H_{D7'}$ = 110,5 m		
Presiunea parțială		
Stare	$p_{D7'Ox}$ [bara]	$p_{D7'He}$ [bara]
$D_{7'}$	0,6025	11,4475
Participația masică		
Stare	$m_{D7'Ox}$ [-]	$m_{D7'He}$ [-]
$D_{7'}$	0,2963	0,7037
Participația volumică		
Stare	$r_{D7'Ox}$ [-]	$r_{D7'He}$ [-]
$D_{7'}$	0,0500	0,9500

Tabelul 4.93 Starea D_8 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D8am} = 12,0975 bara		
H_{D8} = 110,975 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{D8Ox} [bara]	p_{D8He} [bara]
D_8	0,65	11,4475
Participația masică		
Stare	m_{D8Ox} [-]	m_{D8He} [-]
D_8	0,3116	0,6884
Participația volumică		
Stare	r_{D8Ox} [-]	r_{D8He} [-]
D_8	0,0537	0,9493

Tabelul 4.94 Starea intermediară $D_{8'}$– Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D8'am}$ = 11,5975 bara		
$H_{D8'}$ = 105,975 m		
Presiunea parțială		
Stare	$p_{D8'Ox}$ [bara]	$p_{D8'He}$ [bara]
$D_{8'}$	0,5799	11,0176
Participația masică		
Stare	$m_{D8'Ox}$ [-]	$m_{D8'He}$ [-]
$D_{8'}$	0,3116	0,6884
Participația volumică		
Stare	$r_{D8'Ox}$ [-]	$r_{D8'He}$ [-]
$D_{8'}$	0,0537	0,9493

Tabelul 4.95 Starea D_9 – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D9am} = 11,6676 bara		
H_{D9} = 106,676 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{D9Ox} [bara]	p_{D9He} [bara]
D_9	0,65	11,0176
Participația masică		
Stare	m_{D9Ox} [-]	m_{D9He} [-]
D_9	0,3206	0,6794
Participația volumică		
Stare	r_{D9Ox} [-]	r_{D9He} [-]
D_9	0,0557	0,9443

Tabelul 4.96 Starea intermediară $D_{9'}$– Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D9'am}$ = 11,1676 bara		
$H_{D9'}$ = 101,676 m		
Presiunea parțială		
Stare	$p_{D9'Ox}$ [bara]	$p_{D9'He}$ [bara]
$D_{9'}$	0,6220	10,5456
Participația masică		
Stare	$m_{D9'Ox}$ [-]	$m_{D9'He}$ [-]
$D_{9'}$	0,3206	0,6794
Participația volumică		
Stare	$r_{D9'Ox}$ [-]	$r_{D9'He}$ [-]
$D_{9'}$	0,0557	0,9443

Tabelul 4.97 Starea D_{10} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D10am} = 11,1956 bara		
H_{D10} = 101,956 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{D10Ox} [bara]	p_{D10He} [bara]
D_{10}	0,65	10,5456
Participația masică		
Stare	m_{D10Ox} [-]	m_{D10He} [-]
D_{10}	0,3304	0,6696
Participația volumică		
Stare	r_{D10Ox} [-]	r_{D10He} [-]
D_{10}	0,0581	0,9419

Tabelul 4.98 Starea intermediară $D_{10'}$– Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D10'am}$ = 10,6956 bara		
$H_{D10'}$ = 96,956 m		
Presiunea parțială		
Stare	$p_{D10'Ox}$ [bara]	$p_{D10'He}$ [bara]
$D_{10'}$	0,6214	10,0742
Participația masică		
Stare	$m_{D10'Ox}$ [-]	$m_{D10'He}$ [-]
$D_{10'}$	0,3304	0,6696
Participația volumică		
Stare	$r_{D10'Ox}$ [-]	$r_{D10'He}$ [-]
$D_{10'}$	0,0581	0,9419

Tabelul 4.99 Starea D_{11} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D11am} = 10,7242 bara		
H_{D11} = 97,242 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{D11Ox} [bara]	p_{D11He} [bara]
D_{11}	0,65	10,0742
Participația masică		
Stare	m_{D11Ox} [-]	m_{D11He} [-]
D_{11}	0,3404	0,6596
Participația volumică		
Stare	r_{D11Ox} [-]	r_{D11He} [-]
D_{11}	0,0606	0,9394

Tabelul 4.100 Starea intermediară $D_{11'}$– Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D11'am}$ = 10,2242 bara		
$H_{D11'}$ = 92,242 m		
Presiunea parțială		
Stare	$p_{D11'Ox}$ [bara]	$p_{D11'He}$ [bara]
$D_{11'}$	0,6196	9,6046
Participația masică		
Stare	$m_{D11'Ox}$ [-]	$m_{D11'He}$ [-]
$D_{11'}$	0,3404	0,6596
Participația volumică		
Stare	$r_{D11'Ox}$ [-]	$r_{D11'He}$ [-]
$D_{11'}$	0,0606	0,9394

Tabelul 4.101 Starea D_{12} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D12am} = 10,2546 bara		
H_{D12} = 92,546 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{D12Ox} [bara]	p_{D12He} [bara]
D_{12}	0,65	9,6046
Participația masică		
Stare	m_{D121Ox} [-]	m_{D12He} [-]
D_{12}	0,3513	0,6487
Participația volumică		
Stare	r_{D12Ox} [-]	r_{D12He} [-]
D_{12}	0,0634	0,9366

Tabelul 4.102 Starea intermediară $D_{12'}$– Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D12'am}$ = 9,7546 bara		
$H_{D12'}$ = 87,546 m		
Presiunea parțială		
Stare	$p_{D12'Ox}$ [bara]	$p_{D12'He}$ [bara]
$D_{12'}$	0,6184	9,1362
Participația masică		
Stare	$m_{D12'Ox}$ [-]	$m_{D12'He}$ [-]
$D_{12'}$	0,3513	0,6487
Participația volumică		
Stare	$r_{D12'Ox}$ [-]	$r_{D12'He}$ [-]
$D_{12'}$	0,0634	0,9366

Tabelul 4.103 Starea D_{13} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D13am} = 9,7862 bara		
H_{D13} = 87,862 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{D13Ox} [bara]	p_{D13He} [bara]
D_{13}	0,65	9,1362
Participația masică		
Stare	m_{D13Ox} [-]	m_{D13He} [-]
D_{13}	0,3626	0,6374
Participația volumică		
Stare	r_{D13Ox} [-]	r_{D13He} [-]
D_{13}	0,0664	0,9336

Tabelul 4.104 Starea intermediară $D_{13'}$– Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D13'am}$ = 9,2862 bara		
$H_{D13'}$ = 82,862 m		
Presiunea parțială		
Stare	$p_{D13'Ox}$ [bara]	$p_{D13'He}$ [bara]
$D_{13'}$	0,6166	8,6696
Participația masică		
Stare	$m_{D13'Ox}$ [-]	$m_{D13'He}$ [-]
$D_{13'}$	0,3626	0,6374
Participația volumică		
Stare	$r_{D13'Ox}$ [-]	$r_{D13'He}$ [-]
$D_{13'}$	0,0664	0,9336

Tabelul 4.105 Starea D_{14} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D14am} = 9,3196 bara		
H_{D14} = 83,196 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{D14Ox} [bara]	p_{D14He} [bara]
D_{14}	0,65	8,6696
Participația masică		
Stare	m_{D14Ox} [-]	m_{D14He} [-]
D_{14}	0,3748	0,6252
Participația volumică		
Stare	r_{D14Ox} [-]	r_{D14He} [-]
D_{14}	0,0697	0,9303

Tabelul 4.106 Starea intermediară $D_{14'}$– Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D14'am}$ = 8,8196 bara		
$H_{D14'}$ = 78,196 m		
Presiunea parțială		
Stare	$p_{D14'Ox}$ [bara]	$p_{D14'He}$ [bara]
$D_{14'}$	0,6147	8,2049
Participația masică		
Stare	$m_{D14'Ox}$ [-]	$m_{D14'He}$ [-]
$D_{14'}$	0,3748	0,6252
Participația volumică		
Stare	$r_{D14'Ox}$ [-]	$r_{D14'He}$ [-]
$D_{14'}$	0,0697	0,9303

Tabelul 4.107 Starea D_{15} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D15am} = 8,8549 bara		
H_{D15} = 78,549 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{D15Ox} [bara]	p_{D15He} [bara]
D_{15}	0,65	8,2049
Participația masică		
Stare	m_{D15Ox} [-]	m_{D15He} [-]
D_{15}	0,3879	0,6121
Participația volumică		
Stare	r_{D15Ox} [-]	r_{D15He} [-]
D_{15}	0,0734	0,9266

Tabelul 4.108 Starea intermediară $D_{15'}$– Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D15'am}$ = 8,3549 bara		
$H_{D15'}$ = 73,549 m		
Presiunea parțială		
Stare	$p_{D15'Ox}$ [bara]	$p_{D15'He}$ [bara]
$D_{15'}$	0,6132	7,7417
Participația masică		
Stare	$m_{D15'Ox}$ [-]	$m_{D15'He}$ [-]
$D_{15'}$	0,3879	0,6121
Participația volumică		
Stare	$r_{D15'Ox}$ [-]	$r_{D15'He}$ [-]
$D_{15'}$	0,0734	0,9266

Tabelul 4.109 Starea D_{16} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D16am} = 8,3917 bara		
H_{D16} = 73,917 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{D16Ox} [bara]	p_{D16He} [bara]
D_{16}	0,65	7,7417
Participația masică		
Stare	m_{D16Ox} [-]	m_{D16He} [-]
D_{16}	0,4019	0,5981
Participația volumică		
Stare	r_{D16Ox} [-]	r_{D16He} [-]
D_{16}	0,0775	0,9225

Tabelul 4.110 Starea intermediară $D_{16'}$– Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D16'am}$ = 7,8917 bara		
$H_{D16'}$ = 68,917 m		
Presiunea parțială		
Stare	$p_{D16'Ox}$ [bara]	$p_{D16'He}$ [bara]
$D_{16'}$	0,6116	7,2801
Participația masică		
Stare	$m_{D16'Ox}$ [-]	$m_{D16'He}$ [-]
$D_{16'}$	0,4019	0,5981
Participația volumică		
Stare	$r_{D16'Ox}$ [-]	$r_{D16'He}$ [-]
$D_{16'}$	0,0775	0,9225

Tabelul 4.111 Starea D_{17} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D17am} = 7,9301 bara		
H_{D17} = 69,301 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{D17Ox} [bara]	p_{D17He} [bara]
D_{17}	0,65	7,2801
Participația masică		
Stare	m_{D17Ox} [-]	m_{D17He} [-]
D_{17}	0,4168	0,5832
Participația volumică		
Stare	r_{D17Ox} [-]	r_{D17He} [-]
D_{17}	0,0820	0,9180

Tabelul 4.112 Starea intermediară $D_{17'}$– Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D17'am}$ = 7,4301 bara		
$H_{D17'}$ = 64,301 m		
Presiunea parțială		
Stare	$p_{D17'Ox}$ [bara]	$p_{D17'He}$ [bara]
$D_{17'}$	0,6093	6,8208
Participația masică		
Stare	$m_{D17'Ox}$ [-]	$m_{D17'He}$ [-]
$D_{17'}$	0,4168	0,5832
Participația volumică		
Stare	$r_{D17'O}$ [-]	$r_{D17'He}$ [-]
$D_{17'}$	0,0820	0,9180

Tabelul 4.113 Starea D_{18} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D18am} = 7,4708 bara		
H_{D18} = 64,708 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{D18Ox} [bara]	p_{D18He} [bara]
D_{18}	0,65	6,8208
Participația masică		
Stare	m_{D18Ox} [-]	m_{D18He} [-]
D_{18}	0,4326	0,5674
Participația volumică		
Stare	r_{D18Ox} [-]	r_{D18He} [-]
D_{18}	0,0870	0,9130

Tabelul 4.114 Starea intermediară $D_{18'}$– Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D18'am}$ = 6,9708 bara		
$H_{D18'}$ = 59,708 m		
Presiunea parțială		
Stare	$p_{D18'Ox}$ [bara]	$p_{D18'He}$ [bara]
$D_{18'}$	0,6065	6,3643
Participația masică		
Stare	$m_{D18'Ox}$ [-]	$m_{D18'He}$ [-]
$D_{18'}$	0,4326	0,5674
Participația volumică		
Stare	$r_{D18'Ox}$ [-]	$r_{D18'He}$ [-]
$D_{18'}$	0,0870	0,9130

Tabelul 4.115 Starea D_{19} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D19am} = 7,0143 bara		
H_{D19} = 60,143 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{D19Ox} [bara]	p_{D19He} [bara]
D_{19}	0,65	6,3643
Participația masică		
Stare	m_{D19Ox} [-]	m_{D19He} [-]
D_{19}	0,4498	0,5502
Participația volumică		
Stare	r_{D19Ox} [-]	r_{D19He} [-]
D_{19}	0,0927	0,9073

Tabelul 4.116 Starea intermediară $D_{19'}$– Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D19'am}$ = 6,5143 bara		
$H_{D19'}$ = 55,143 m		
Presiunea parțială		
Stare	$p_{D19'Ox}$ [bara]	$p_{D19'He}$ [bara]
$D_{19'}$	0,6039	5,9104
Participația masică		
Stare	$m_{D19'Ox}$ [-]	$m_{D19'He}$ [-]
$D_{19'}$	0,4498	0,5502
Participația volumică		
Stare	$r_{D19'Ox}$ [-]	$r_{D19'He}$ [-]
$D_{19'}$	0,0927	0,9073

Tabelul 4.117 Starea D_{20} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D20am} = 6,5604 bara		
H_{D20} = 55,604 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{D20Ox} [bara]	p_{D20He} [bara]
D_{20}	0,65	5,9104
Participația masică		
Stare	m_{D20Ox} [-]	m_{D20He} [-]
D_{20}	0,4681	0,5319
Participația volumică		
Stare	r_{D20Ox} [-]	r_{D20He} [-]
D_{20}	0,0991	0,9009

Tabelul 4.118 Starea intermediară $D_{20'}$– Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D20'am}$ = 6,0604 bara		
$H_{D20'}$ = 50,604 m		
Presiunea parțială		
Stare	$p_{D20'Ox}$ [bara]	$p_{D20'He}$ [bara]
$D_{20'}$	0,6006	5,4598
Participația masică		
Stare	$m_{D20'Ox}$ [-]	$m_{D20'He}$ [-]
$D_{20'}$	0,4681	0,5319
Participația volumică		
Stare	$r_{D20'Ox}$ [-]	$r_{D20'He}$ [-]
$D_{20'}$	0,0991	0,9009

Tabelul 4.119 Starea D_{21} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D21am} = 6,1098 bara		
H_{D21} = 51,098 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{D21Ox} [bara]	p_{D21He} [bara]
D_{21}	0,65	5,4598
Participația masică		
Stare	m_{D21Ox} [-]	m_{D21He} [-]
D_{21}	0,4878	0,5122
Participația volumică		
Stare	r_{D21Ox} [-]	r_{D21He} [-]
D_{21}	0,1064	0,8936

Tabelul 4.120 Starea intermediară $D_{21'}$– Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D21'am}$ = 5,6098 bara		
$H_{D21'}$ = 46,098 m		
Presiunea parțială		
Stare	$p_{D21'Ox}$ [bara]	$p_{D21'He}$ [bara]
$D_{21'}$	0,5969	5,0129
Participația masică		
Stare	$m_{D21'Ox}$ [-]	$m_{D21'He}$ [-]
$D_{21'}$	0,4878	0,5122
Participația volumică		
Stare	$r_{D21'Ox}$ [-]	$r_{D21'He}$ [-]
$D_{21'}$	0,1064	0,8936

Tabelul 4.121 Starea D_{22} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D22am} = 5,6629 bara		
H_{D22} = 46,629 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{D22Ox} [bara]	p_{D22He} [bara]
D_{22}	0,65	5,0129
Participația masică		
Stare	m_{D22Ox} [-]	m_{D22He} [-]
D_{22}	0,5092	0,4908
Participația volumică		
Stare	r_{D22Ox} [-]	r_{D22He} [-]
D_{22}	0,1148	0,8852

Tabelul 4.122 Starea intermediară $D_{22'}$– Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D22'am}$ = 5,1629 bara		
$H_{D22'}$ = 29,75 m		
Presiunea parțială		
Stare	$p_{D22'Ox}$ [bara]	$p_{D22'He}$ [bara]
$D_{22'}$	0,5927	4,5702
Participația masică		
Stare	$m_{D22'Ox}$ [-]	$m_{D22'He}$ [-]
$D_{22'}$	0,5092	0,4908
Participația volumică		
Stare	$r_{D22'Ox}$ [-]	$r_{D22'He}$ [-]
$D_{22'}$	0,1148	0,8852

Tabelul 4.123 Starea D_{23} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D23am} = 5,2202 bara		
H_{D23} = 42,202 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{D23Ox} [bara]	p_{D23He} [bara]
D_{23}	0,65	4,5702
Participația masică		
Stare	m_{D23Ox} [-]	m_{D23He} [-]
D_{23}	0,5322	0,4678
Participația volumică		
Stare	r_{D23Ox} [-]	r_{D23He} [-]
D_{23}	0,1245	0,8755

Tabelul 4.124 Starea intermediară $D_{23'}$– Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

$p_{D23'am}$ = 4 ,7202 bara		
$H_{D23'}$ = 25 m		
Presiunea parțială		
Stare	$p_{D23'Ox}$ [bara]	$p_{D23'He}$ [bara]
$D_{23'}$	0,5877	4,1325
Participația masică		
Stare	$m_{D23'Ox}$ [-]	$m_{D23'He}$ [-]
$D_{23'}$	0,5322	0,4678
Participația volumică		
Stare	$r_{D23'Ox}$ [-]	$r_{D23'He}$ [-]
$D_{23'}$	0,1245	0,8755

Tabelul 4.125 Starea D_{24} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D24am} = 4,7825 bara		
H_{D24} = 37,825 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{D24Ox} [bara]	p_{D24He} [bara]
D_{24}	0,65	4,1325
Participația masică		
Stare	m_{D24Ox} [-]	m_{D24He} [-]
D_{24}	0,5572	0,4428
Participația volumică		
Stare	r_{D24Ox} [-]	r_{D24He} [-]
D_{24}	0,1359	0,8641

Tabelul 4.126 Starea D_{25} – Valorile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale gazelor componente, presiunii amestecului și adâncimii echivalente

p_{D25am} = 2,6294 bara		
H_{D25} = 16,294 m		
Presiunea parțială		
Stare	p_{D25Ox} [bara]	p_{D25He} [bara]
D_{25}	0,65	1,9794
Participația masică		
Stare	m_{D25Ox} [-]	m_{D25He} [-]
D_{25}	0,7243	0,2757
Participația volumică		
Stare	r_{D25Ox} [-]	r_{D25He} [-]
D_{25}	0,2472	0,7528

4.4.2.3 Etapa finală de decompresie (EFD-BV)

Etapa Finală de Decompresie (EFD-BV) constă în decompresia scafandrilor prin depresurizarea barocamerei cu amestecul existent în barocameră în starea D_{25}, participațiile volumice ale celor două componente (Ox, He) rămânând constante până când se atinge presiunea atmosferică.

În tot acest timp, pe ultimii 16 m, scafandrii respiră amestec HELIOX cu o concentrație a oxigenului de 24,72 % (r_{Ox} = 0,2472).

Variația presiunilor parțiale ale componentelor amestecului binar cu adâncimea de scufundare, în faza de decompresie FD-BV, obținute cu modelul matematic MMSS-BV și prezentate în tabelele 4.91...4.126, este reprezentată grafic în figura 4.18.

Variația participațiilor masice ale componentelor amestecului binar cu adâncimea de scufundare, în faza de decompresie FD-BV, obținute cu modelul matematic MMSS-BV și prezentate în tabelele 4.91...4.126, este reprezentată grafic în figura 4.19.

Variația participațiilor volumice ale componentelor amestecului binar cu adâncimea de scufundare, în faza de decompresie FD-BV, obținute cu modelul matematic MMSS-BV și prezentate în tabelele 4.91...4.126, este reprezentată grafic în figura 4.20.

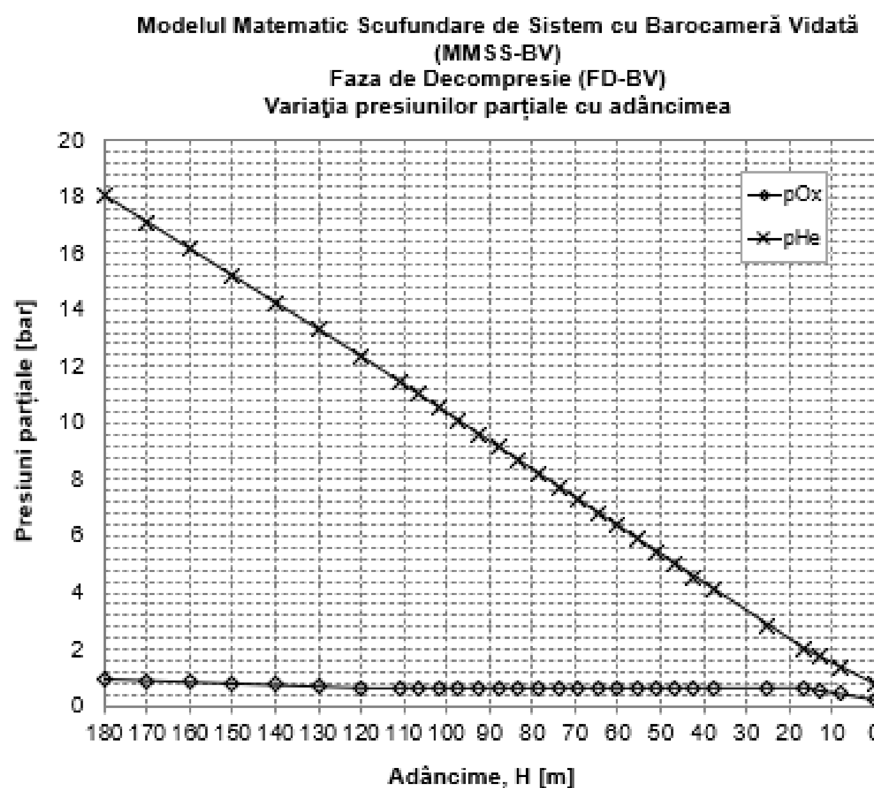


Figura 4.18 Variația presiunilor parțiale ale componentelor amestecului binar din barocameră, cu adâncimea, în faza de decompresie, FD-BV

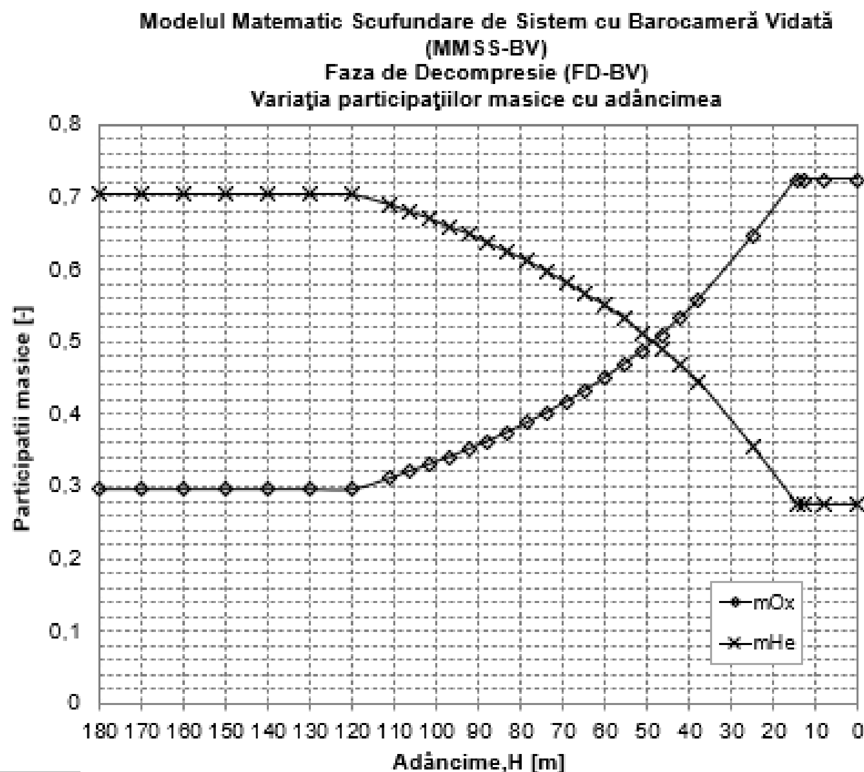


Figura 4.19 Variația participațiilor masice ale componentelor amestecului binar din barocameră, cu adâncimea, în faza de decompresie, FD-BV

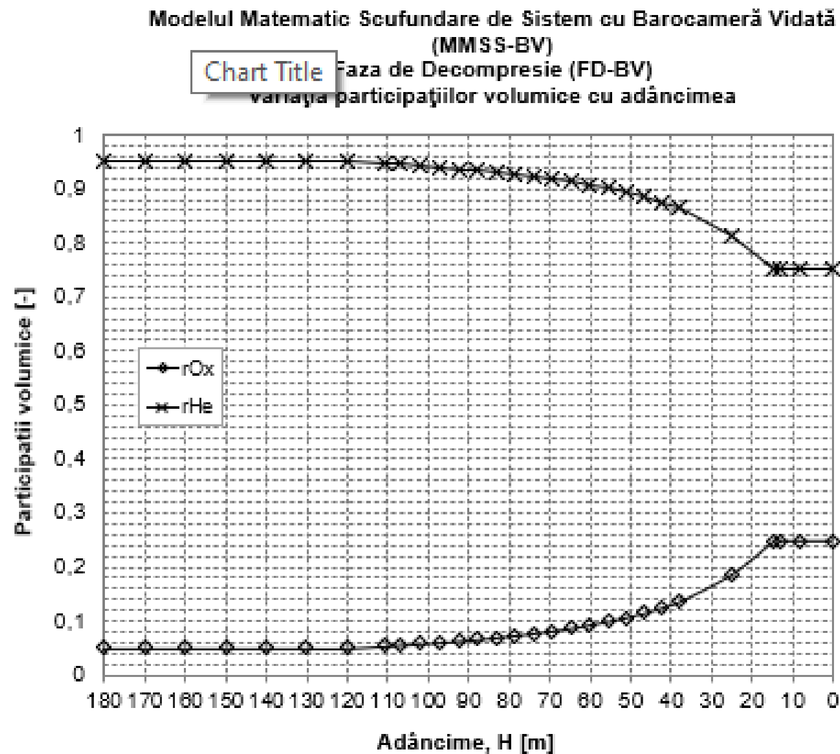


Figura 4.20 Variația participațiilor volumice ale componentelor amestecului binar din barocameră, cu adâncimea, în faza de decompresie, FD-BV

4.4.3 Validarea modelului matematic al unei scufundări cu vidarea barocamerei printr-un test de scufundare reală de sistem, la adâncimea de 180 m

În cadrul acestui paragraf, s-a trecut la verificarea rezultatelor Modelului Matematic pentru Scufundarea de Sistem cu Barocameră Vidată (MMSS-BV), la adâncimea de 180 m, model prezentat în detaliu în paragrafele 4.4.1 și 4.4.2, cu valorile mărimilor caracteristice din planul scufundării reale, tip test, la adâncimea de 180 (PSSR-BV), efectuată în Laboratorul Hiperbar din Centrul de Scafandri Constanța (CSC), plan prezentat în paragraful 4.3. Această verificare, s-a efectuat pentru ca, prin comparație, să se valideze modelul matematic elaborat. Comparația cu scopul validării modelului matematic MMSS-BV s-a efectuat doar pentru faza de decompresie (FD-BV), fază pentru care planul a constat din tabelul de decompresie OXY-HELIUM DIVING DECOMPRESSION TABLES, tabel completat cu mărimile caracteristice amestecului din barocameră pe timpul decompresiei.

În figurile 4.21, 4.22 și 4.23 se prezintă comparațiile grafice pentru variațiile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice pentru cazul barocamerei vidate inițial, în faza decompresiei (FD-BV), dintre valorile obținute prin modelul MMSS-BV și valorile din planul de scufundare reală PSSR-BV.

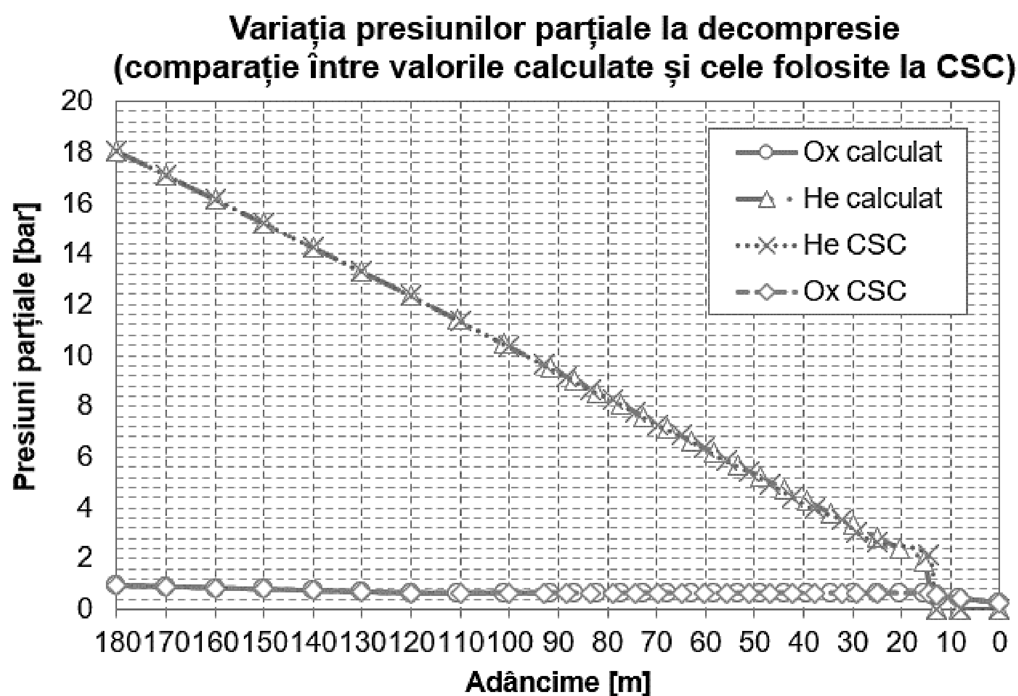


Figura 4.21 Comparație între variațiile presiunilor parțiale în faza decompresiei, pentru cazul barocamerei inițial vidate, (FD-BV), atât cu valorile obținute prin modelul MMSS-BV cât și din planul scufundării reale PSSR-BV efectuate la CSC

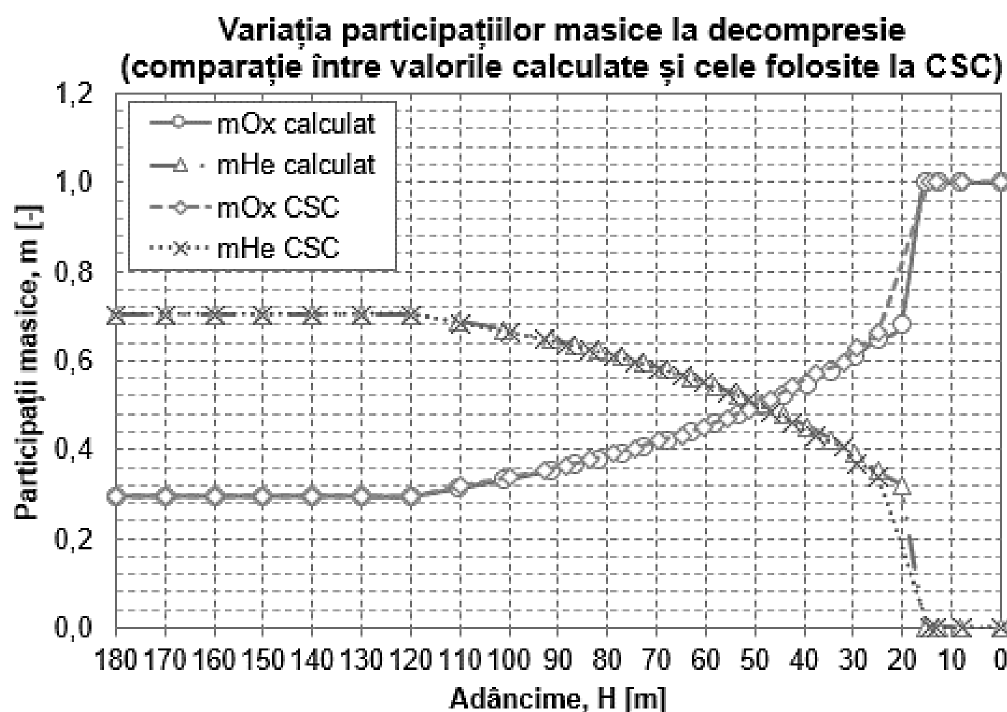


Figura 4.22 Comparație între variațiile participațiilor masice în faza decompresiei, pentru cazul barocamerei inițial vidate, (FD-BV), atât cu valorile obținute prin modelul MMSS-BV cât și din planul scufundării reale PSSR-BV efectuate la CSC

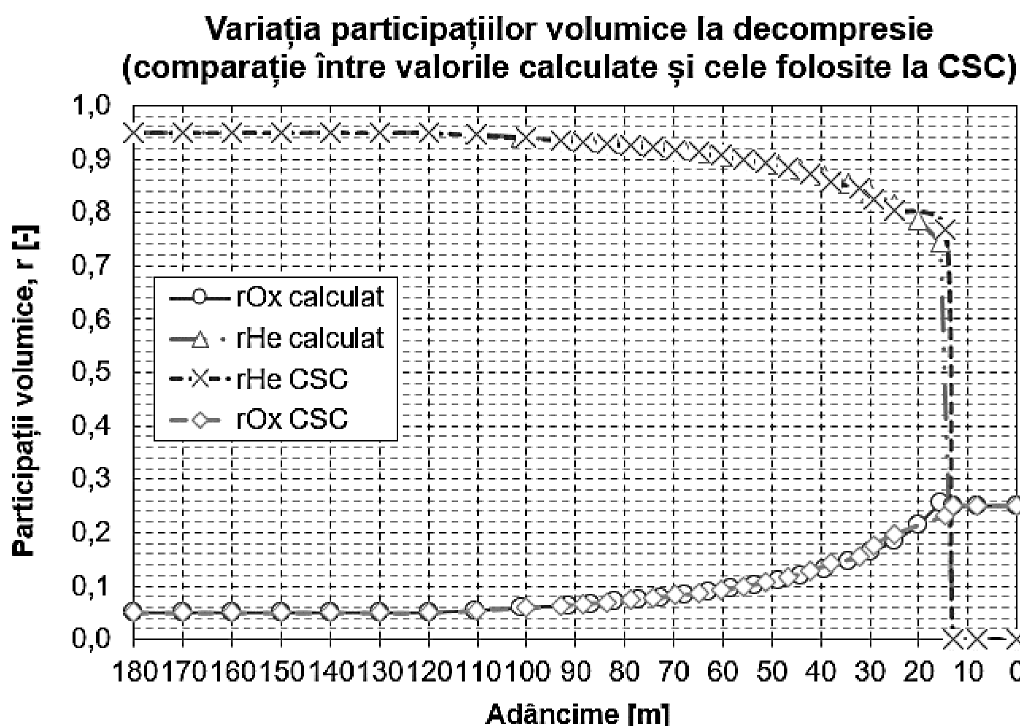


Figura 4.23 Comparație între variațiile participațiilor volumice în faza decompresiei, pentru cazul barocamerei inițial vidate, (FD-BV), atât cu valorile obținute prin modelul MMSS-BV cât și din planul scufundării reale PSSR-BV efectuate la CSC

Din analiza graficelor din figurile 4.21, 4.22 și 4.23, se constată o suprapunere aproape perfectă a graficelor care descriu variațiile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice ale componentelor amestecului de gaze din barocameră (Ox, He), pentru modelul matematic al scufundării de sistem la 180 m în cazul vidării inițiale a barocamerei MMSS-BV și pentru planul de scufundare de sistem reală la 180 m, pentru barocamera inițial vidată PSSR-BV, pentru faza de decompresie FD-BV.

Având în vedere cele de mai sus, se poate trage concluzia că Modelul Matematic pentru Scufundarea de Sistem la adâncimea de 180 m, considerându-se Barocamera Vidată inițial (MMSS-BV), este pe deplin validat de testul experimental efectuat la Laboratorul Hiperbar al Centrului de Scafandri Constanța din cadrul Forțelor Navale Române, efectuat conform Planului Scufundării Reale de Sistem (PSSR-BV).

Prin urmare, se poate admite faptul că, se pot elabora modele matematice complexe care pot descrie, cu o foarte bună precizie, fenomenele aferente proceselor hiperbare din cadrul diferitelor scufundări de sistem, de mare adâncime.

Elaborarea de modele matematice pentru diferitele scufundări de sistem reprezintă un prim pas înainte spre urmărirea și controlul automat ale scufundării cu ajutorul unor traductoare și elemente de execuție specializate și a unor calculatoare de proces, de asemenea specializate.

5

FABRICAREA AMESTECURILOR RESPIRATORII FOLOSITE ÎN DOMENIUL SCUFUNDĂRILOR

Amestecurile de gaz respiratorii, binare sau ternare, se pot fabrica fie printr-o injecție succesivă și controlată a gazelor componente în recipiente cu volum constant, urmărindu-se presiunea din recipiente, fie printr-o amestecare în flux continuu, cu injectarea simultană a gazelor componente la proporția dorită. Pentru injectarea gazelor componente în vederea realizării amestecului respirator dorit, sunt folosite dispozitive prevăzute cu ajutaje calibrate lucrând în domeniul critic (sonic), ce asigură livrarea componentelor gazoase la debite masice constante. Această a doua metodă este studiată și expusă în cadrul prezentei cărți, reprezentând o metodă nouă, originală, propusă de autorii acestei cărți. De asemenea, în acest capitol se vor prezenta și alte metode și procedee pentru fabricarea amestecurilor respiratorii.

5.1 METODA INJECTĂRII SUCCESIVE UTILIZATĂ LA FABRICAREA AMESTECURILOR RESPIRATORII

Pentru stabilirea compoziției amestecurilor de gaze binare sau ternare, este propusă o metodă sugestivă ce facilitează efectuarea calculelor necesare. Se consideră schema generală prezentată în figura 5.1.

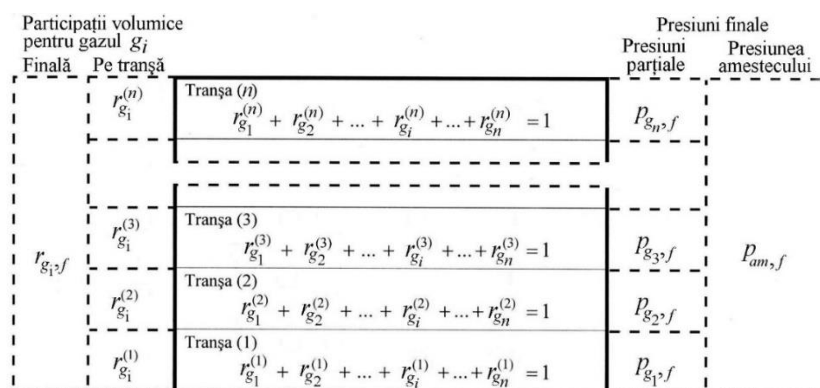


Figura 5.1 Schema generală de calcul pentru fabricarea unui amestec respirator de gaze

Aplicarea metodei presupune, mai întâi, reprezentarea sub forma unui dreptunghi a recipientului în care se prepară amestecul. Deoarece metoda presupune, în mod fictiv, că gazele rămân stratificate, acestea se reprezintă

fiecare în câte un compartiment al recipientului. În partea dreaptă a dreptunghiului ce reprezintă recipientul se notează presiunile parțiale finale ale fiecărui gaz component $p_{g_i,f}$ și presiunea finală a amestecului $p_{am,f}$ exprimate în scară manometrică. În partea stângă se notează participațiile volumice $r_{g_i}^{(j)}$ ale gazului pur i din amestecurile injectate prin fiecare tranșă de injecție (j), precum și concentrația finală dorită a acestui gaz $r_{g_i,f}$ din amestecul care este propus a fi obținut în recipient.

Considerând schema din figura 5.1, presiunea parțială finală a unui gaz component se exprimă astfel:

$$p_{g_i,f} = p_{am,f} \cdot r_{g_i,f} = p_{g_1,f} \cdot r_{g_i}^{(1)} + p_{g_2,f} \cdot r_{g_i}^{(2)} + \ldots + p_{g_i,f} \cdot r_{g_i}^{(f)} + \ldots + p_{g_n,f} \cdot r_{g_i}^{(n)}$$

(5.1)

în care exponentul $(j)[(j)=(1),(2)\ldots(n)]$ reprezintă numărul tranșei de injecție de gaze în recipient.

5.1.1 Realizarea amestecurilor binare NITROX utilizând metoda injectării succesive

Pornind de la metoda de calcul a amestecurilor de gaze respiratorii prezentată anterior, pentru **fabricarea unui amestec NITROX din gaze pure, oxigen și azot**, schema de calcul utilizată este prezentată în figura 5.2.

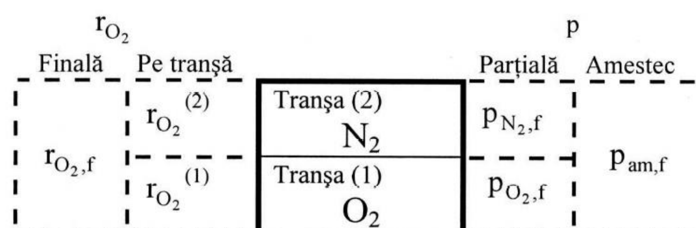


Figura 5.2 Schema de calcul pentru fabricarea unui amestec respirator NITROX pornind de la oxigen și azot

Presiunea parțială este:

$$p_{O_2,f} = p_{am,f}\ r_{O_2,f} = p_{O_2,f}\ r_{O_2}^{(1)} + p_{N_2,f}\ r_{O_2}^{(2)} \qquad (5.2)$$

Dacă se dorește realizarea unui amestec respirator NITROX alcătuit din 30% oxigen și 70% azot (30/70) la presiunea de 200 bar (sc. man.), considerând schema de calcul din figura 5.3, ecuația (5.2) se scrie:

$$200 \cdot 0,3 = x \cdot 1 + (200 - x) \cdot 0 \qquad (5.3)$$

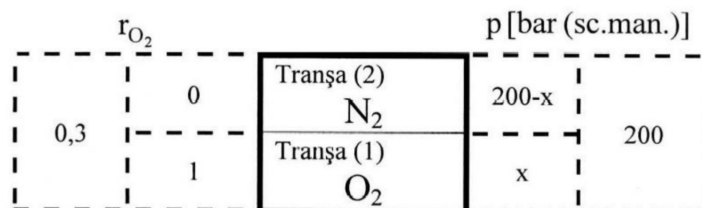


Figura 5.3 Schema de calcul pentru fabricarea unui amestec respirator NITROX 30/70 din oxigen și azot

Rezultă $x = 60$ bar (sc. man.) care reprezintă atât valoarea presiunii parțiale finale a oxigenului cât și presiunea la sfârșitul primei tranșe de presurizare a recipientului prin injecție de oxigen pur.

Etapele ce trebuie parcurse pentru a realiza amestecul NITROX 30/70 în condițiile de presiune specificate sunt:

- se presurizează recipientul mai întâi cu oxigen pur până când presiunea devine 60 bar (sc. man.);
- se presurizează în continuare recipientul cu azot pur până când presiunea amestecului din recipient devine 200 bar (sc. man.), adică cu încă 140 bar.

Realizarea unui amestec NITROX din oxigen și aer presupune măsuri speciale privind manevrarea oxigenului pur. În aceste condiții, pentru a evita presiunile ridicate în cazul oxigenului, se va injecta aer (21% oxigen și 79% azot) în oxigenul pur stocat în recipient.

În figura 5.4 este prezentată schema de calcul corespunzătoare fabricării amestecului NITROX 30/70 la 200 bar (sc. man.).

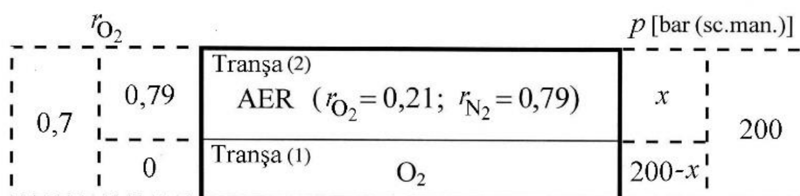


Figura 5.4 Schema de calcul pentru fabricarea unui amestec respirator NITROX 30/70 din oxigen și aer

Ecuația corespunzătoare schemei de calcul este:

$$p_{am,f} \; r_{N_2,f} = p_{O_2,f} \; r_{N_2}^{(1)} + p_{aer,f} \; r_{N_2}^{(2)} \qquad (5.4)$$

iar prin înlocuire relația se scrie:

$$200 \cdot 0,7 = (200 - x) \cdot 0 + x \cdot 0,79 \qquad (5.5)$$

de unde rezultă că: $x = 177,2$ bar (sc. man.).

Etapele ce trebuie parcurse în acest caz pentru fabricarea amestecului respirator sunt:

- se presurizează recipientul mai întâi cu oxigen pur până când presiunea devine 200 - 177,2 = 22,8 bar (sc. man.);
- se continuă presurizarea cu încă 177,2 bar cu aer, până când presiunea amestecului din recipient devine egală cu 200 bar (sc. man.).

Amestecurile NITROX au răspândirea cea mai mare fiind folosite la o gamă foarte largă de incursiuni subacvatice. Metoda de fabricare a acestora prin injectarea succesivă a oxigenului și a aerului este cea mai utilizată, motiv pentru care au fost realizate tabele ce prezintă variațiile de presiune rezultate prin cele două tranșe de presurizare. Un astfel de exemplu este tabelul 5.1 presiunea finală fiind în acest caz de 200 bar (sc. man.).

Tabelul 5.1 Fabricarea amestecurilor NITROX prin injectarea succesivă de oxigen și aer

Amestec NITROX [%O_2 / %N_2]	**Presiunea din recipient după presurizarea cu oxigen pur** [bar (sc.man.)]	**Creșterea de presiune prin presurizarea cu aer** [bar]	**Presiunea finală a amestecului** [bar (sc.man)]
60/40	98,7	101,3	200
50/50	73,4	126,6	200
40/60	48,1	151,9	200
32,5/67,5	29,1	170,9	200
32/68	27,8	172,2	200
30/70	22,8	177,2	200

La fabricarea amestecurilor NITROX se utilizează oxigen cu puritate ridicată (minimum 99,5% O_2) și aer respirator corespunzător normativelor în vigoare (21% O_2 și 79% N_2).

5.1.2 Realizarea amestecurilor binare HELIOX utilizând metoda injectării succesive

Pornind de la metoda generală prezentată la începutul acestui capitol, pentru prepararea unui amestec respirator HELIOX, realizat într-o anumită proporție, se aplică schema de calcul din figura 5.1 particularizată însă pentru amestecul dorit. Presupunând că se urmărește **fabricarea unui amestec HELIOX din gaze pure, heliu și oxigen**, cu proporțiile dintre gaze 20% oxigen și 80% heliu (HELIOX 20/80) la 200 bar (sc. man.) schema de calcul specifică pentru această situație este prezentată în figura 5.5.

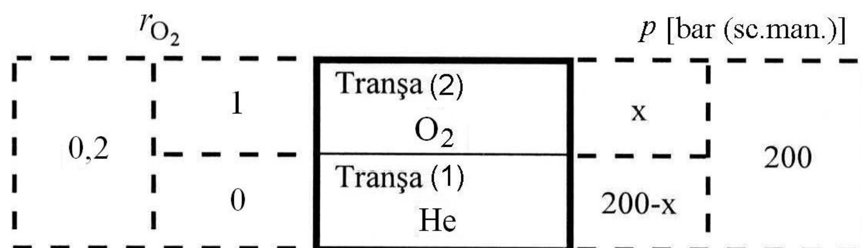


Figura 5.5 Schema de calcul pentru fabricarea unui amestec respirator HELIOX 20/80 din heliu și oxigen

Relația de calcul corespunzătoare cazului de față este:

$$p_{am,f} \; r_{O_2,f} = p_{He,f} \; r_{O_2}^{(1)} + p_{O_2,f} \; r_{O_2}^{(2)} \tag{5.6}$$

adică:

$$200 \cdot 0,2 = (200 - x) \cdot 0 + x \cdot 1 \tag{5.7}$$

de unde rezultă $x = 40$ bar (sc.man.).

Deoarece între cele două gaze există o diferență mare de densitate, modul de preparare a amestecurilor HELIOX, în general, presupune injectarea peste heliu a oxigenului și aceasta cât mai violent posibil pentru a se realiza o mai bună omogenizare a amestecului. Așadar, pentru fabricarea amestecului respirator HELIOX 20/80 se presurizează mai întâi recipientul cu heliu pur până la presiunea de 160 bar (sc. man.), iar apoi se continuă presurizarea cu încă 40 bar cu oxigen pur până la presiunea de 200 bar (sc. man.).

5.1.3 Realizarea amestecurilor respiratorii ternare utilizând metoda injectării succesive

Pentru realizarea amestecurilor ternare se folosesc aceleași metode de preparare ca și în cazul celor binare. Astfel, un amestec ternar în a cărui compoziție intră heliu, azot și oxigen, poate fi obținut fie din heliu și aer, fie din heliu și amestec binar azot-oxigen (NITROX).

Există mai multe variante de realizare ale amestecului TRIMIX. Prima și cea mai folosită constă din următoarele etape:

- buteliile goale sunt umplute parțial cu heliu;
- se continuă presurizarea cu aer sau NITROX (care a fost preparat anterior) până la umplerea recipientelor;
- se efectuează calcule sau măsurători privind procentajele de oxigen și heliu.

Pentru amestecurile respiratorii realizate din heliu presurizat cu aer se folosește câteodată denumirea de HELIAER.

De asemenea, o altă modalitate de fabricare a amestecurilor TRIMIX este:

- buteliile goale sunt umplute parțial cu heliu;
- ulterior sistemul injectează o cantitate oxigen pur în butelii;
- buteliile se presurizează complet cu aer sau NITROX;
- se efectuează calcule sau măsurători privind procentajele de oxigen și heliu.

5.2. PROCEDEU ȘI INSTALAȚIE PENTRU FABRICAREA AMESTECURILOR RESPIRATORII NITROX PRIN INJECȚIE SUCCESIVĂ ÎN DOUĂ ETAPE

Pentru exemplificarea modului concret în care se fabrică amestecurile respiratorii pentru scufundare, în figura 5.6 se prezintă *schema unei instalații pentru fabricarea de amestecuri NITROX* în vederea încărcării cu acest amestec a buteliilor de scafandru.

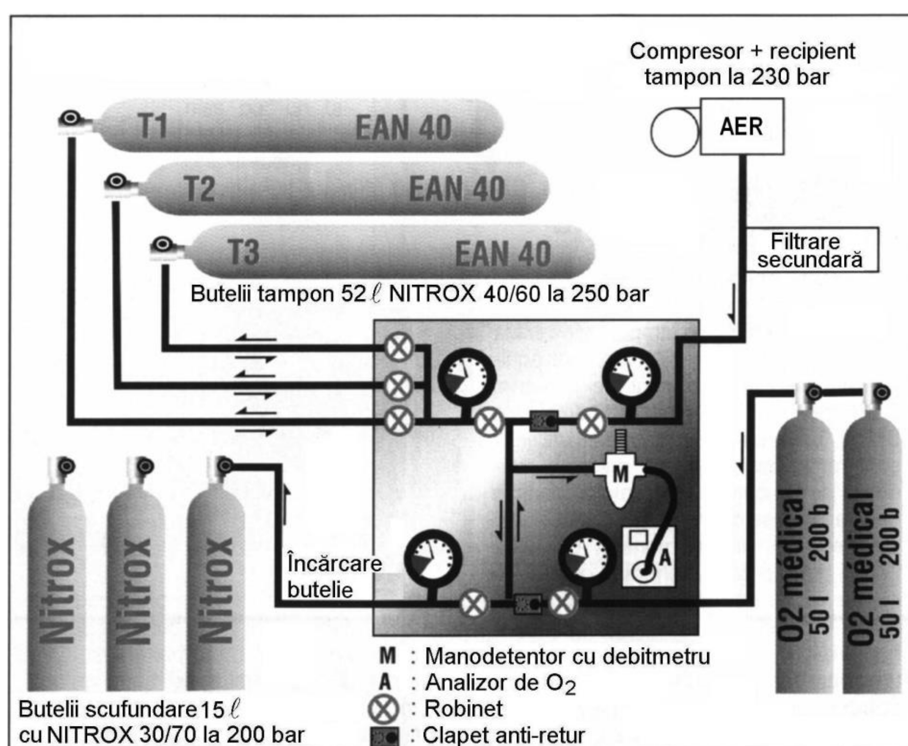


Figura 5.6 Schema unei instalații de fabricare de amestecuri NITROX pentru încărcarea buteliilor de scafandru

Instalația este alcătuită, în primul rând, dintr-un compresor de aer, la ieșirea căruia s-a prevăzut un element de filtrare suplimentar pentru eliminarea tuturor urmelor de ulei. De aici, aerul sub presiune este trimis la tabloul de manevră și control (figura 5.7). Acesta comportă și o a doua intrare și anume intrarea oxigenului pur furnizat de butelii de oxigen de 50 l cu oxigen stocat la 200 bar (sc. man.). Cele două circuite, echipate cu robinete și clapete anti-retur, duc la un ansamblu de butelii tampon (figura 5.8) unde se stochează amestecul

NITROX primar 40/60 (40% oxigen și 60% azot) obținut prin amestecare de oxigen și aer. Trebuie menționat faptul că doar partea de circuit cuprinsă între buteliile de oxigen pur și buteliile tampon de NITROX 40/60 trebuie degresate conform normelor de lucru cu oxigen, prin restul circuitelor de umplere, între buteliile tampon și buteliile de scufundare, circulând amestecuri NITROX cu un procentaj de oxigen de până la 40%, deci fără risc.

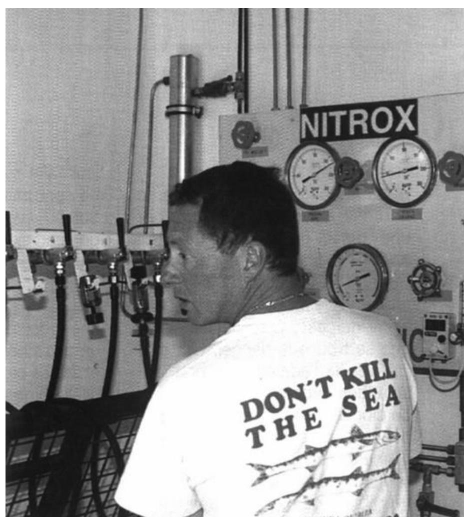


Figura 5.7 Tabloul de manevră și control al instalației de preparare a amestecurilor NITROX



Figura 5.8 Buteliile tampon pentru stocarea de amestec NITROX primar 40/60

În continuare, se prezintă un exemplu concret de preparare a unui amestec NITROX 30/70 (30% oxigen și 70% azot) în buteliile de scufundare ce trebuie umplute cu acest amestec la presiunea de 200 bar (sc. man.). Prepararea acestui amestec se face în două etape:

– în prima etapă se fabrică amestecul primar NITROX 40/60 din oxigen și aer în buteliile tampon la 250 bar (sc. man.), conform procedurii arătate anterior, ecuația corespunzătoare fiind:

$$250 \cdot 0,6 = (250 \cdot x) \cdot 0 + x \cdot 0,79 ,$$

de unde rezultă $x \cong 190$ bar (sc. man.); prin urmare, amestecul NITROX 40/60 la 250 bar (sc. man.) se prepară astfel: se presurizează buteliile tampon mai întâi cu oxigen pur livrat din buteliile de oxigen până când presiunea din buteliile tampon devine 250 – 190 = 60 bar (sc. man.), după care, cu ajutorul compresorului de aer se continuă presurizarea cu încă 190 bar cu aer comprimat, până când presiunea amestecului din buteliile tampon devine egală cu 250 bar (sc. man.); astfel, s-a obținut în buteliile tampon un amestec primar NITROX 40/60, la presiunea de 250 bar (sc. man.); această primă serie de operațiuni se va relua de fiecare dată când este necesar să se obțină o rezervă

suficientă de NITROX 40/60 la o presiune superioară presiunii de 150 bar (sc. man.), caz limită de umplere cu NITROX a buteliilor de scufundare;

– în a doua etapă, se prepară amestecul NITROX definitiv în buteliile de scufundare la procentajul de oxigen dorit, pornind la amestecul NITROX primar; pentru exemplificare se prezintă cazul în care se dorește prepararea unui amestec NITROX 30/70 (30% oxigen și 70% azot) la presiunea de 200 bar (sc. man.), în buteliile de scufundare, prin corectarea amestecului NITROX 40/60 cu aer comprimat furnizat de compresor; conform cu procedura privind corectarea unui amestec NITROX prea bogat în oxigen, ecuația caracteristică fiind:

$$200 \cdot 0,30 = (200 - x) \cdot 0,21 + x \cdot 0,40 \,,$$

de unde rezultă $x \cong 95$ bar (sc. man.); prin urmare, pentru fabricarea amestecului NITROX 30/70 la 200 bar (sc. man.), se presurizează butelia de scufundare cu amestec NITROX 40/60 din buteliile tampon, până când presiunea din butelia de scufundare devine egală cu 95 bar (sc. man.), după care, cu ajutorul compresorului se injectează în butelia de scufundare 200 – 95 = 105 bar aer comprimat, până când presiunea din butelia de scufundare devine egală cu 200 bar (sc. man.); astfel, în butelia de scufundare s-a obținut un amestec NITROX 30/70 la presiunea dorită de 200 bar (sc. man.).

Cu aceeași instalație, se pot prepara și amestecuri NITROX la un procentaj de oxigen superior lui 40% (în acest caz, toată instalația și buteliile de scufundare trebuie degresate). Astfel, este suficient de a injecta în buteliile de scufundare oxigen pur din buteliile de oxigen și apoi de a completa, prin injectare de amestec primar NITROX 40/60, până la presiunea dorită, urmând procedura de corectare a unui amestec NITROX prea sărac în oxigen.

Fiecare dintre circuite este echipat cu câte un *manometru cu clasă superioară* de precizie, pentru a se asigura prepararea unui amestec cu concentrație volumică de oxigen cât mai exactă. Tabloul de manevră și control mai este echipat cu un *manodetentor* și cu un *analizor de oxigen* care permite controlarea amestecului preparat în fiecare butelie de scufundare. De asemenea, se mai poate utiliza un analizor de mână ce poate fi branșat la ieșirea fiecăreia dintre buteliile de scufundare. În cazul în care analizorul de oxigen este integrat tabloului de manevră și control, trebuie purjat circuitul de analiză pentru fiecare butelie controlată.

Pentru prepararea locală de amestecuri respiratorii binare sau ternare se pot utiliza instalații portabile (figura 5.9) de mici dimensiuni care cuprind un *tablou de control* de mici dimensiuni sub forma unei valize, prevăzut cu trei branșamente: primul este pentru intrare oxigen pur de la o *butelie de oxigen medical*, al doilea este pentru intrare aer comprimat de la un *compresor portabil* și al treilea pentru ieșire gaze către *butelia de scufundare*. Fiecare circuit este echipat cu câte un manometru, umplerea buteliei de scufundare fiind reglată printr-un manometru de precizie, de preferință digital.



Figura 5.9 Instalație portabilă pentru prepararea locală a amestecurilor respiratorii

Pentru prepararea de amestecuri respiratorii binare sau ternare în cantitate mare și foarte mare care să asigure stocaje importante de amestecuri pentru scufundări colective în sisteme hiperbare specializate, se vor utiliza *instalații de fabricare a amestecurilor respiratorii de mari dimensiuni* așa cum este cea prezentată în figura 5.10.



Figura 5.10 Instalație pentru prepararea unor cantități mari de amestecuri respiratorii

5.3 PROCEDEE SPECIALE DE FABRICARE A AMESTECURILOR RESPIRATORII BINARE NITROX

Pentru fabricarea amestecurilor NITROX se folosesc în mod frecvent trei procedee și anume:

- prepararea amestecului considerând presiunile parțiale – amestec NITROX îmbogățit cu aer;
- separarea azotului cu ajutorul membranelor – aer denitrogenat;
- omogenizarea continuă a gazelor ce formează amestecul – amestec NITROX îmbogățit.

5.3.1 Procedeul de preparare a amestecului NITROX cu considerarea presiunilor parțiale ale gazelor

Procedeul de preparare a amestecului considerând presiunile parțiale presupune injectarea de oxigen pur într-o butelie de scufundare unde, mai apoi, este introdus aer comprimat „curat”, numit și aer compatibil cu oxigenul (Oxygen Compatible Air) creându-se astfel amestecul dorit. Trebuie spus că termenul „curat” este o noțiune relativă, calitatea aerului respirator fiind stabilită în standarde precum CGA Grade E, BS4275 sau DIN 3188.

În ceea ce privește noțiunea de „compatibilitate” a aerului comprimat folosit la prepararea amestecurilor NITROX aceasta se referă la o serie de criterii operaționale legate de amestecarea aerului cu oxigen pur sau cu un mediu bogat în oxigen. Trebuie menționat că nu există un standard unic legat de calitatea aerului utilizat la crearea amestecurilor NITROX.

În anul 1992, agențiile de formare în domeniul scufundărilor și alte agenții guvernamentale din S.U.A. la întâlnirea din Orlando, Florida, au căzut de acord asupra unui set de standarde privind aerul compatibil cu oxigenul. Aceste standarde reprezintă o aprobare unanimă bazată pe cunoaștere, experiență și tehnologiile disponibile la acea dată. Valorile privind calitatea aerului sunt date în tabelul 5.2.

Tabelul 5.2 Valorile indicatorilor de calitate a aerului compatibil cu oxigenul la prepararea amestecurilor NITROX

Hidrocarburi condensate	0,1mg/m^3
Hidrocarburi în stare gazoasă	15 ppm
Apă (punct de rouă)	- 50^{o}C
Dioxid de carbon	500 ppm
Monoxid de carbon	2 ppm

În figura 5.11 este prezentată, schematic, o instalație pentru prepararea amestecurilor NITROX prin procedeul bazat pe presiunile parțiale ale gazelor.

Avantajele acestui procedeu de preparare sunt:

- costuri inițiale reduse;
- capabil să producă amestecuri cu orice procentaj.

Dezavantaje:

- procesul de încărcare al buteliilor necesită un volum mare de muncă și este lent, circa 20 – 30 minute o butelie;
- buteliile și sistemul de umplere trebuie să respecte normele privind puritatea oxigenului;
- potențial periculos în cazul în care în butelie ajunge în mod accidental ulei (efect diesel ce duce la explozie);

- nu se poate folosi întreaga cantitate de oxigen din butelia ce înmagazinează acest gaz; pentru a depăși acest neajuns este nevoie de o pompă specială (booster);
- realizarea corectă și precisă a amestecului depinde de priceperea operatorului instalației;
- este nevoie să se prevadă un stoc de butelii cu oxigen.

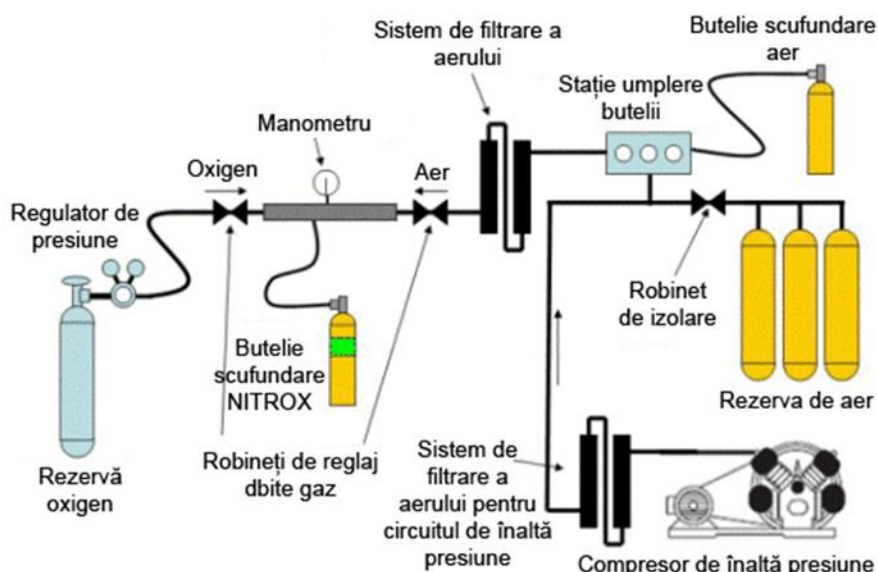


Figura 5.11 Schema instalației de preparare a amestecurilor NITROX prin procedeul bazat pe presiunile parțiale ale gazelor

5.3.2 Procedeul de preparare a amestecului NITROX cu ajutorul membranelor

Procedeul de separe a azotului cu ajutorul membranelor a fost utilizat inițial în industria sudurii pentru producerea azotului. Presupune utilizarea unei surse de aer furnizat la o presiune redusă. Curentul astfel format este dirijat printr-un sistem special de membrane. Acestea sunt de două tipuri, una destinată trecerii azotului, iar cealaltă pentru permeat (amestec de oxigen îmbogățit) care este distribuit compresorului de înaltă presiune (figura 5.12).

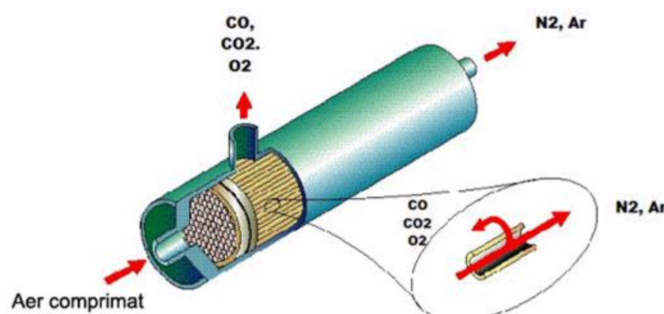


Figura 5.12 Dispozitiv de separare cu membrane

Conținutul de oxigen este reglat fie prin modificarea presiunii de furnizare către membrane fie prin reglarea deschiderii destinată trecerii azotului. Funcționarea optimă a sistemului de membrane se realizează după circa 30 minute de la punerea în funcțiune.

Compresorul de înaltă presiune este conectat fie direct la buteliile utilizate pentru scufundări, fie la recipienți de stocare a amestecului NITROX (figura 5.13).

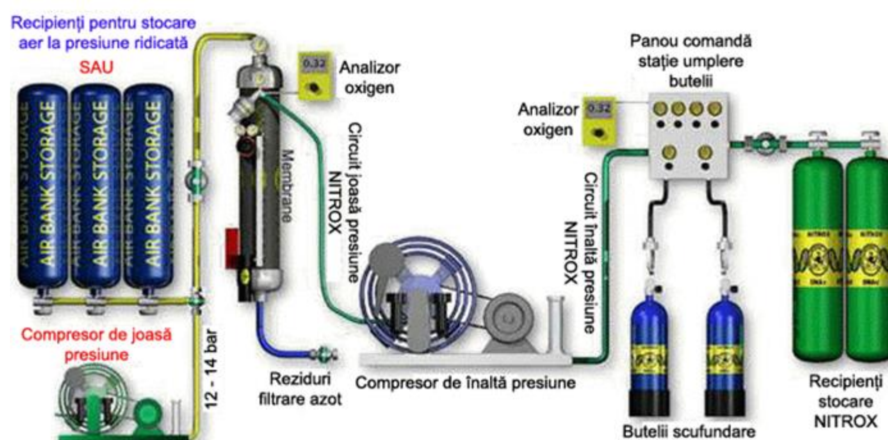


Figura 5.13 Schema instalației de prepararea a amestecurilor NITROX prin procedeul de separare a azotului cu membrane

Avantajele procedeului:

- nu necesită oxigen stocat în butelii (independență față de producătorii de oxigen);
- se poate fabrica amestec NITROX în condiții de siguranță (până la un conținut de 40% oxigen);
- în prealabil, nu sunt necesare operațiuni pentru curățarea buteliilor și a sistemului de umplere.

Dezavantaje:

- costuri de achiziție mari;
- punerea în funcțiune a sistemului este greoaie, iar exploatarea acestuia este dificilă; reglarea amestecului de oxigen este greu de realizat; aerul încălzit ce intră în contact cu membrana provoacă o reacție chimică în senzorul de oxigen ce duce la decalibrarea analizorului de oxigen;
- costuri adiționale (electricitate/ mentenanță) asociate operării compresorului de joasă presiune ce asigură aerul către sistemul de membrane;
- dacă în locul compresorului de joasă presiune sistemul de membrane este alimentat de la recipiente sub presiune pentru stocarea aerului, atunci ca urmare a creșterii consumului de energie electrică, cheltuielile de exploatare se măresc și uzura

compresorului de înaltă presiune, care în această situație produce aerul comprimat, este în acest caz mai mare;

- dacă filtrele pentru îmbunătățirea calității aerului nu sunt schimbate la timp atunci este posibil ca membranele să se colmateze cu particule fapt ce duce la necesitate schimbării acestora și implicit la costuri suplimentare;
- membranele sunt fragile și pot fi deteriorate cu ușurință dacă sistemul nu este exploatat corect; dacă este furnizat un curent de aer la presiune mai mare sau daca acesta nu are o temperatură corespunzătoare, structura internă poate fi deteriorată fapt ce duce la necesitatea înlocuirii membranei;
- pentru un sistem dotat cu compresor de joasă presiune, înlocuirea membranei costă cât circa jumătate din sistem;
- sistemul trebuie monitorizat permanent în timpul funcționării;
- producerea de amestec NITROX cu ajutorul acestui sistem duce la cele mai mari costuri per butelie de scufundare.

5.3.3 Procedeul de preparare a amestecului NITROX cu omogenizarea gazelor componente

Procedeul de omogenizare continuă a gazelor componente presupune utilizatea unor recipienți pentru stocarea O_2 și un dispozitiv special, brevetat (NITROX Stick), ce asigură omogenizarea aerului și a oxigenului pur înainte de a fi admis în compresorul de înaltă presiune (figura 5.14).

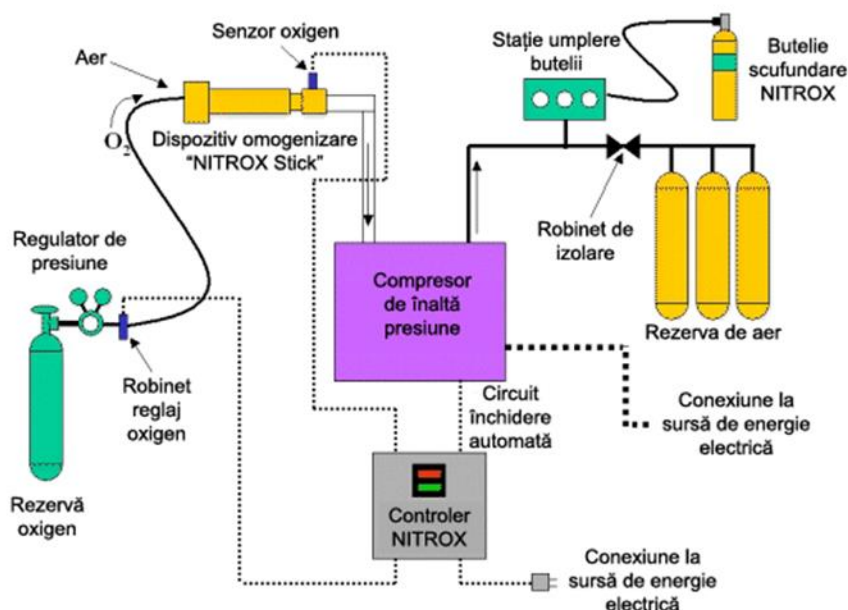


Figura 5.14 Schema instalației de preparare a amestecurilor NITROX prin procedeul de omogenizare continuă a gazelor

Schema constructivă și imaginea unui astfel de dispozitiv de omogenizare este prezentată în figura 5.15.

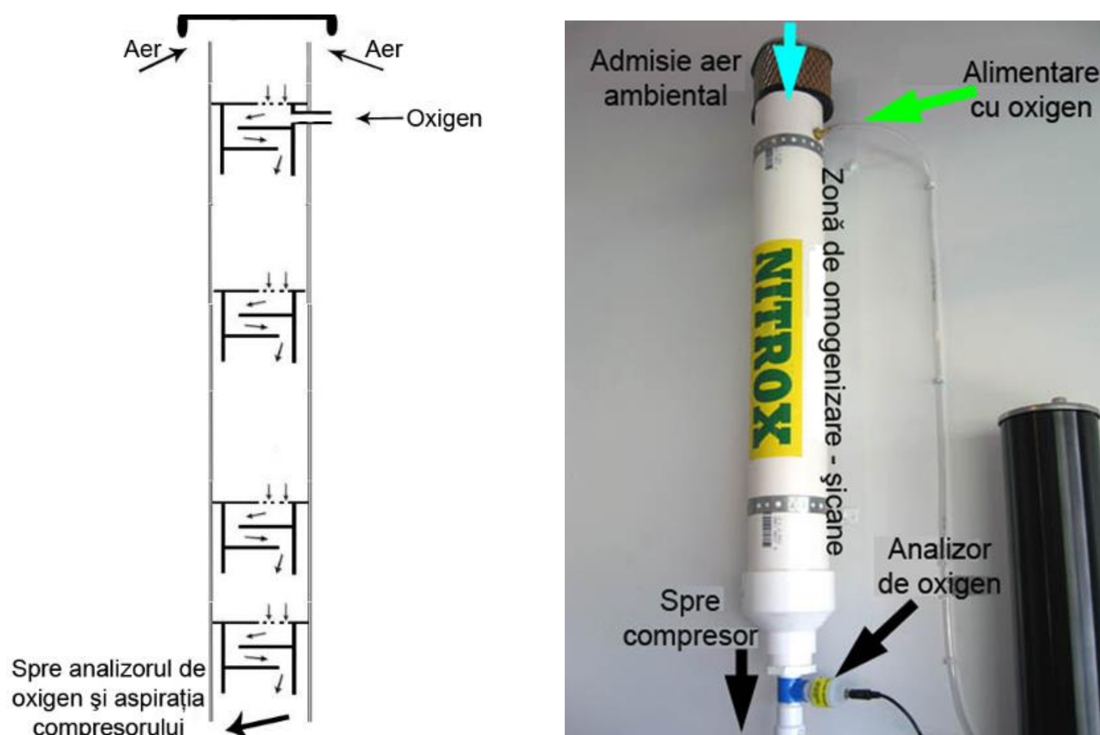


Figura 5.15 Schema constructivă și imaginea unui dispozitv „NITROX Stick”

Pornirea sistemului presupune, mai întâi, izolarea recipienților de stocare a aerului, eliminarea aerului din instalație respectând direcția normală de curgere (prin secțiunea de refulare a compresorului), iar apoi, în timp ce compresorul funcționează, se cuplează butelia de oxigen și se furnizază un aport de oxigen astfel încât să se atingă concentrația dorită în amestec. Procesul de purjare trebuie continuat până când analizorul de oxigen care monitorizează refularea compresorului indică concentrația de oxigen dorită. Din acest moment compresorul de aer, filtrele asociate și conductele pentru transportul aerului se consideră curățate. Refularea compresorului de înaltă presiune poate alimenta acum fie buteliile folosite la scufundări, fie recipienții de stocare a amestecului NITROX (figura 5.14). Întreaga operație, de la punerea în funcțiune a sistemului până la începerea umplerii buteliilor sau a recipienților de stocare, durează circa 5 -10 minute.

Avantajele utilizării unui astfel de sistem sunt reprezentate de:

- costul moderat de achiziție al aparaturii și posibilitatea fabricării în condiții de siguranță a unui amestec de până la 40% oxigen;
- nu există restricții la încărcare privind prezența oxigenului în butelii;

- prezența controller-ului NITROX (figura 5.14) oferă operatorului posibilitatea să deruleze și alte activități, în timp ce procesul de umplere a buteliilor este în desfășurare;
- prin aplicarea acestui procedeu, costurile aferente forței de muncă scad;
- precizie ridicată în prepararea amestecului NITROX;
- siguranță sporită în exploatare;
- costurile cele mai reduse, în comparație cu alte sisteme, pentru umplerea unei butelii cu amestec NITROX.

Dezavantajele sunt reprezentate de necesitatea supravegherii permanente a sistemului dacă acesta nu a fost dotat cu controller NITROX și de necesitatea existenței, permanent, a unei rezerve de oxigen. Trebuie menționat faptul că exploatarea unui astfel de sistem este justificată în special când acesta este dotat cu controller NITROX.

Deși dispozitivul pentru producerea amestecului respirator a fost pezentat și încadrat anterior într-o schemă pentru producerea amestecului NITROX exită variante constructive, mai complexe, care asigură prepararea și a amestecurilor TRIMIX (figura 5.16).

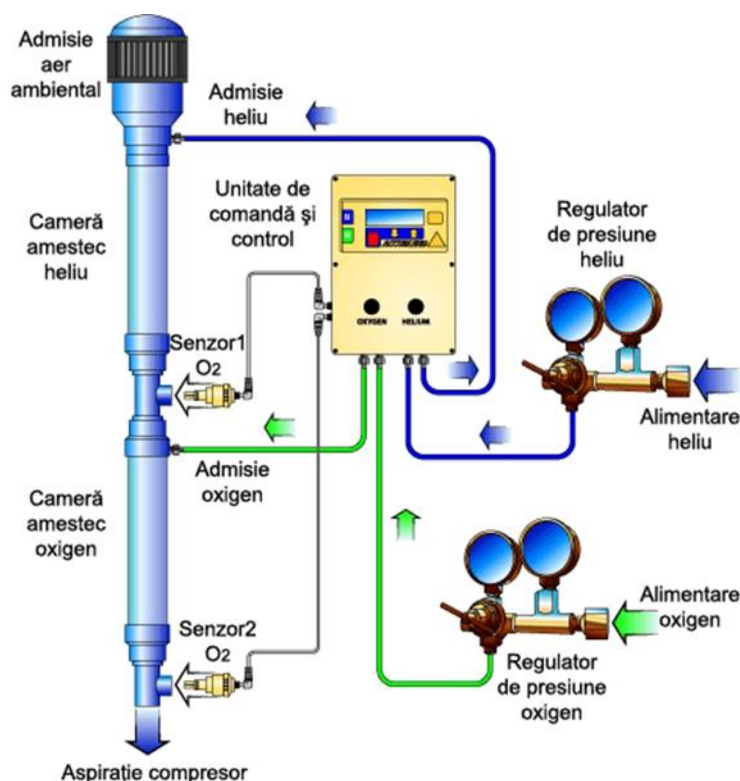


Figura 5.16 Dispozitiv pentru realizarea amestecului în vederea producerii NITROX/ TRIMIX

Dispozitivul este conectat la sursa de oxigen și heliu prin intermediul a două regulatoare de înaltă performanță care asigură reglarea, cu foarte mare precizie, a cantității de gaz. Fiecare regulator comunică cu o unitate de control pe al cărui ecran se poate citi procentajul celor două gaze. De asemenea, unitatea de control asigură întreruperea livrării oxigenului sau heliului dacă:

- comanda de calibrare automată este activă în timp ce compresorul funcționează;
- se produce o cădere de tensiune;
- senzorul de oxigen înregistrează valoarea de 39.9% oxigen;
- cablurile senzorilor sunt decuplate;
- comutatorul de alimentare cu energie electrică este oprit;
- funcționarea compresorului este întreruptă.

Unitatea de control, prin softweare-ul său, oferă posibilitatea operatorului de a stabili diverse amestecuri NITROX și TRIMIX și totodată, poate specifica adâncimea echivalentă la care poate apărea narcoza și de asemenea, prin intermediul său pot fi modificate amestecurile NITROX și TRIMIX existente fără a goli recipientele.

5.4 METODE ȘI PROCEDEE DE FABRICARE A AMESTECURILOR RESPIRATORII CONFORM U.S. NAVY

Alegerea metodei de fabricare a amestecurilor respiratorii și implicit a echipamentelor folosite, depinde în mare măsură și de condițiile ambientale. Astfel, unele din metodele descrise în continuare sunt preferate pentru a fi folosite la bordul ambarcațiunilor, iar altele sunt preferate pentru prepararea amestecurilor în centre de umplere a buteliilor sau în laboratoare hiperbare aflate pe uscat.

5.4.1 Metoda de preparare a amestecurilor respiratorii având în vedere presiunile parțiale ale gazelor componente

Aceasta metodă presupune realizarea amestecului gazos prin injectarea în recipientele de stocare a elementelor componente în diverse proporții, urmărind în amestecul astfel format presiunea parțială a fiecăruia dintre gaze.

Principiu fundamental al metodei este legea lui Dalton privind presiunile parțiale. Pentru calculul presiunii parțiale a gazelor din amestec poate fi aplicată unul din cele două procedee de lucru și anume:

- procedeul de calcul în ipoteza gazului ideal;
- procedeul de calcul considerând gazul real.

5.4.1.1 Procedeul de calcul în ipoteza gazului ideal

Acest procedu presupune că presiunea este direct proporțională cu temperatura și densitatea gazului. Deoarece nu se ține cont de diferențele de

compresibilitate a gazelor, fabricarea amestecurilor respiratorii folosind acest procedeu de calcul se face etapizat. De exemplu, oxigenul fiind mai compresibil decât heliul, inițial se va introduce o cantitate mai mică de oxigen decât a fost estimată, se analizează amestecul și se completează în consecință. Pentru calculul cu exactitate a presiunilor parțiale ale gazelor din amestec se folosesc metode (tabele) de corecție.

Dotările necesare pentru prepararea amestecului respirator prin acest procedeu sunt: buteliile sau recipientele pentru stocarea gazului inert și a oxigenului și pentru înmagazinarea amestecului fabricat (figura 5.17). Există și dispozitive de transfer compacte, dotate cu toate aparatele de monitorizare și organele de reglaj necesare, la care se cuplează direct cele trei categorii de butelii (figura 5.18).

Prepararea amestecurilor respiratorii aplicând metoda gazului ideal presupune parcurgerea următoarelor etape:

- se măsoară presiunea la care sunt stocate în butelii gazul/gazele inerte p_i;
- se estimează prin calcul presiunea din recipientul/recipientele de stocare ale amestecului la finalul procesului de preparare.

U.S. Navy Diving Manual recomandă pentru estimarea acestei valori următoarea relație de calcul:

$$p_F = \frac{p_I + p_{at}}{r_i} - p_{at} \tag{5.8}$$

în care: p_F este presiunea finală din butelia pentru stocarea amestecului [Pa] (exprimată în scară manometrică); nu poate depăși valoarea presiunii de lucru corespunzătoare buteliei pentru stocarea gazului inert; p_I - presiunea din buteliile de stocare a gazului inert [Pa] (exprimată în scară manometrică); r_i - participația volumică a gazului inert din amestecul fabricat.
Apoi:

- se măsoară presiunea existentă în butelia/buteliile pentru stocarea oxigenului p_0.
- se verifică dacă cu valoarea presiunii măsurată la punctul anterior (p_0) se poate asigura finalizarea preparării amestecului.

Conform aceleași surse citate anterior, pentru ca să se poată finaliza prepararea amestecului respirator, este necesar ca pe tot parcursul fabricării, să fie respectată următoarea inegalitatea:

$$p_0 \geq \left(2p_F - p_I\right) + 3,45 \cdot 10^5 \tag{5.9}$$

în care: p_0 este presiunea din butelia/buteliile pentru stocarea oxigenului în [Pa] (exprimată în scară manometrică); $3{,}45 \cdot 10^5$ - suprapresiunea minimă necesară [Pa] exprimată în scară manometrică (50 *psi* conform materialului citat); p_I - presiunea din buteliile de stocare a gazului inert, exprimată în scară manometrică [Pa].

Etapele de lucru sunt următoarele:

- Se conectează buteliile/bateriile de butelii cu oxigen și gaz inert într-o configurație similară cu cea din figura 5.17 sau din figura 5.18.
- Se deschid robinetele corespunzătoare recipientelor pentru stocarea amestecului respirator.
- Se deschide robinetul asociat buteliei/buteliilor cu oxigen și se alimentează butelia/buteliile de stocare ale amestecului până ce se atinge valoarea finală a presiunii p_F.
- Se închid robinetele asociate buteliilor pentru stocarea oxigenului și amestecului respirator.
- Se lasă buteliile timp de cel puțin șase ore pentru a se asigura omogenizarea amestecului, sau dacă se dispune de echipamente de omogenizare, procesul va dura circa o oră.
- Se verifică cantitatea de oxigen din amestec, care de obicei este mai mică decât valoarea estimată.
- Se adaugă oxigen până la obținerea unui amestec având caracteristicile dorite.

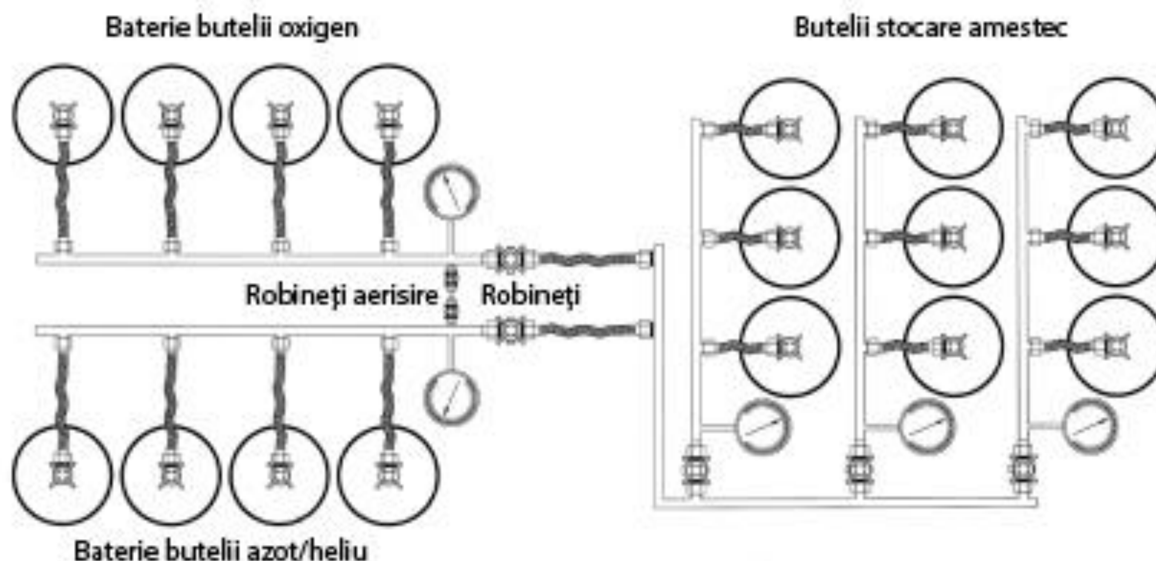


Figura 5.17 Schema instalației pentru preparare etapizată a amestecurilor gazoase respiratorii

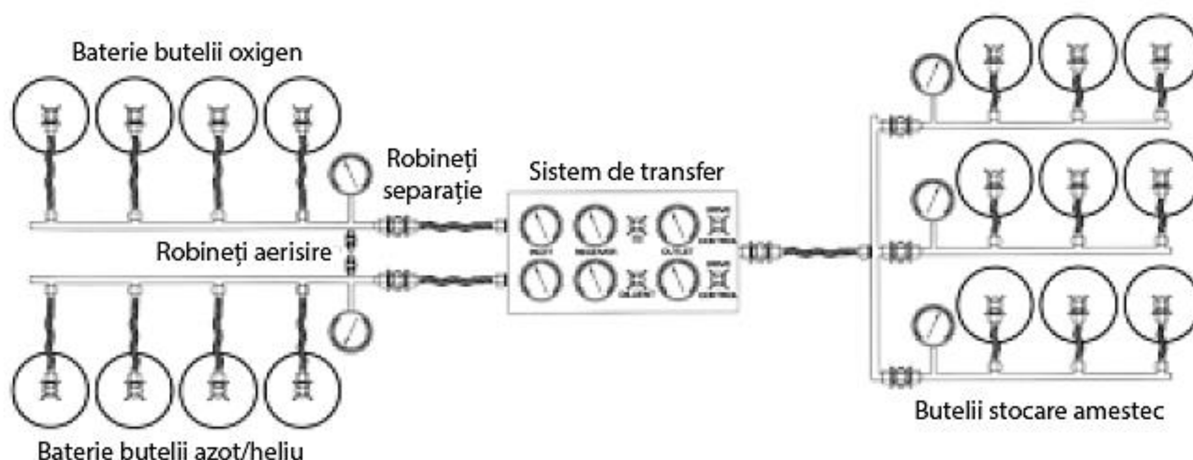


Figura 5.18 Schema instalației cu dispozitiv de transfer pentru prepararea în etape a amestecurilor gazoase respiratorii

Trebuie menționat faptul că, deoarece în realitate gazele amestecate sunt compresibile, procesul de alimentare va genera o creștere a temperaturii din buteliile pentru amestec, fenomen ce viciază valoarea presiunii citită la manometrul corespunzător acestor recipiente. Așadar, în mod real, în procesul de fabricare al amestecului respirator vor exista diferențe de temperatură între gazele componente și temperatura amestecului fabricat. În calcule însă se folosesc valori ale presiunii p_F respectiv p_I pentru gaze având aceeași temperatură. Acest fapt explică de ce este necesară suplimentarea cantității de oxigen, valoarea reală fiind mai mică decât cea așteptată.

5.4.1.2 Procedeul de calcul în ipoteza gazului real

Procedeul de calcul considerând gazul real, ia în calcul și compresibilitatea ca proprietate specifică a fiecărui gaz, între componentele unui amestec fiind diferențe privind această proprietate. Astfel, considerând două gaze diferite, la aceeași valoare a presiunii, în unitatea de volum vor putea fi stocate cantități diferite din aceste gaze.

Indiferent de procedeul ales pentru calculul presiunilor parțiale ale gazelor ce formează amestecul, acesta nu va fi livrat utilizatorului fără a se fi analizat în prealabil conținutul de oxigen.

5.4.2 Metoda de preparare a amestecurilor respiratorii pe baza volumelor gazelor componente

Principiul metodei constă în livrarea gazelor componente, a căror volume sunt de la început cunoscute, către un recipient izobar, cu valoarea presiunii interne apropiată de presiunea atmosferică, care îndeplinește funcția de cameră de amestec. Acest recipient este realizat sub forma unui sac deformabil suficient de mare pentru ca volumul de gaz influent să poată fi înmagazinat în condițiile

de presiune menționate. Ulterior, amestecul format este comprimat și stocat în recipiente de înaltă presiune.

Pentru aplicarea cu bune rezultate a metodei, pe lângă cunoașterea cu exactitate a volumului fiecărui gaz, un alt factor important în procesul de preparare îl joacă temperatura, gazele ce urmează a fi amestecate fiind necesar a avea aceeași temperatură. În caz contrar, aparatele de măsură trebuie să asigure compensare termică.

Realizarea amestecului respirator prin acestă metodă necesită aparatură de înaltă precizie pentru măsurarea exactă a volumului fiecărui gaz component. Calculul acestor volume este în funcție de pocentajul ce trebuie regăsit în amestecul final.

Dacă se respectă condiția ca temperatura gazelor componente să aibă valori egale, prin această metodă se pot prepara, cu foarte mare acuratețe, amestecuri respiratorii. Totodată, în procesul de preparare trebuie avut în vedere ca înițial camera de amestec să fie complet goală sau umplută cu un amestec cunoscut ce nu prezintă riscuri pentru ulilizatorul amestecului fabricat.

5.4.3 Metoda de preparare a amestecurilor respiratorii prin cântărirea componentelor acestora

Această metodă este folosită cu precădere pentru prepararea unor volume mici de amestec respirator cum este în cazul umplerii buteliilor scafandrilor autonomi.

Dozarea gazelor pentru formarea amestecului final se face în funcție de greutatea pe care acestea o adaugă la greutatea inițială a buteliei. Astfel, primul element ce trebuie cunoscut este greutatea recipientului gol și dacă este cazul și greutățile tuturor gazelor aflate în butelie înainte de începerea procesului de preparare.

Spre deosebire de alte metode de preparare a amestecurilor respiratorii, în cazul de față variația temperaturii gazelor nu afecteză acuratețea amestecului. Factorul esențial pentru precizia preparării îl constituie exactitatea cu care se măsoară greutatea fiecărui gaz component. Analizarea compoziției amestecului rezultat, reprezintă o măsură de siguranță înainte ca acesta să fie utilizat.

Alegerea metodei celei mai potrivite pentru prepararea unui amestec respirator din elementele sale componente depinde de o serie de factori de natură tehnică și economică. Astfel, metoda de preparare în funcție de presiunile parțiale ale gazelor din amestec și metoda preparării în flux continuu sunt metode folosite în special pentru fabricarea amestecurilor respiratorii la bordul navelor. Spre deosebire de acestea, metodele de preparare pe baza volumelor și a greutății gazelor componente implică folosirea unor echipamente de precizie (balanțe de înaltă precizie) sensibile la acțiuni externe, cum ar fi mișcarea oscilatorie a navelor. Din aceste motive, ele sunt preferate ca metodă de fabricare în centrele de preparare a amestecurilor sau în incinta laboratoarelor hiperbare aflate pe uscat.

5.5 METODA DE PREPARARE A AMESTECURILOR RESPIRATORII BINARE ȘI TERNARE ÎN FLUX CONTINUU

Preparearea în flux continuu a amestecurilor respiratorii presupune controlarea debitului fiecărui gaz în timp ce este livrat spre a forma amestecul.

Pentru aplicarea acestei metode este nevoie de o instalație specială, precalibrată, care distribuie, individual și în cantitatea necesară, gazele componente spre o cameră de amestec. Gazele componente sunt aduse de la presiunea și temperatura la care sunt stocate în butelii la aceași valori înainte de a fi dozate prin intermediul unor organe de reglaj de înaltă precizie. Aceste elemente ale instalației sunt precalibrate. Pe baza curbelor de calibrare, puse la dispoziție de către fabricantul sistemului, se corelează reglajul acestor elemente cu procentul de gaz din amestecul ce se dorește a se realiza. În timpul procesului de formare, amestecul este permanent analizat pentru a stabili în final întregul istoric al procentajului de oxigen.

Multe din instalațiile actuale încadrate în această categorie dispun de sisteme de control și corecție automate care modifică prin acționarea organelor de reglaj procentul de oxigen din amestec când valorile înregistrate și cele stabilite inițial nu coincid.

Amestecul respirator astfel format poate fi livrat direct către scafandu, spre o barocameră sau poate fi stocat în butelii pentru o utilizare ulterioară.

Sistemele de preparare în flux continuu, datorită principiului de funcționare, sunt instalații ce prepară amestecuri cu mare acuratețe.

În capitolele următoare se prezintă o instalație de preparare a amestecurilor binare și ternare originală, de concepție nouă, propusă de autorii acestei cărți.

5.6 CORECTAREA AMESTECURILOR RESPIRATORII

Fie că este vorba de amestecuri binare sau ternare, în cadrul procesului de fabricare a amestecurilor respiratorii este necesară urmărirea permanentă a participațiilor fiecărui gaz ce formează amestecul. Așa cum s-a arătat și anterior în acest capitol, procesul de monitorizare se face prin intermediul analizoarelor de gaze. Pe baza rezultatelor obținute se efectuază corecții, ce presupun, în general, acțiuni similare celor desfășurate în etapele de fabricare ale amestecului.

Omogenizarea gazelor ce formează amestecul, aspect deosebit de important pentru procesul de fabricare, are la bază două fenomene și anume difuzia moleculară și difuzia turbulentă, specific turbulenței jetului creat la injecția gazului în recipientul cu amestec.

Deoarece, în funcție de natura gazelor implicate, procesul de omogenizare al unui amestec în condiții de repaus poate dura un timp îndelungat (săptamâni), în prezent sunt folosite diverse sisteme pentru a ajuta la formarea unui amestec respirator omogen. Una din soluții este dispozitivul

prezentat în figurile 5.14 și 5.15 denumit în cazul amestecului NITROX „NITROX Stick”.

O altă tehnică folosită adesea pentru omogenizarea amestecurilor de gaze este agitația mecanică (rotirea buteliei).

5.6.1 Corectarea amestecurilor respiratorii prin creșterea cantității de oxigen

Pentru efectuarea acestei operații în U.S. Navy Diving Manual este prezentată parcurgerea următoarelor etape:

- Se calculează procentul de gaz inert din amestec, de exemplu heliu în cazul amestecului HELIOX, prin scăderea din 100 a procentului cunoscut de oxigen.
- Se estimează prin calcul presiunea gazului inert (în ex. heliu) aflat în recipientul/recipientele de stocare, prin înmulțirea valorii în procente a cantității de heliu cu presiunea din butelia corespunzătoare.
- Se determină procentul necesar de gaz inert prin scăderea din 100 a procentului de oxigen dorit.
- Pentru aflarea valorii presiunii din butelia/buteliile cu amestec când s-a atins cantitatea de oxigen dorită, se împarte valoarea presiunii gazului inert, stabilită conform pasului al doilea, la cantitatea de gaz inert necesară (pasul al treilea) în procente exprimate zecimal.
- Se adaugă oxigen până ce această valoare a presiunii este atinsă.

Pentru stabilizarea valorii temperaturii și presiunii, așa cum s-a precizat și anterior, recipientele de stocare trebuie să fie lăsate o perioadă de timp fără a se interveni asupra amestecului. După stabilizare, dacă se constată că este necesar, se va mai adăuga oxigen.

Etapele prezentate în acest paragraf sunt exprimate sintetizat prin relația de calcul:

$$p_f = \frac{p_i\left(1-\left(r_{Ox}\right)_i\right)}{\left(1-\left(r_{Ox}\right)_f\right)} \tag{5.10}$$

în care: p_f este presiunea finală din butelie/butelii; p_i - presiunea inițială din butelie/butelii; $\left(r_{Ox}\right)_i$ - participația volumică înițială a oxigenului; $\left(r_{Ox}\right)_f$ - participația volumică finală a oxigenului.

5.6.2 Corectarea amestecurilor respiratorii prin reducerea cantității de oxigen

În acest caz succesiunea etapelor ce trebuie urmate este:

- Se înmulțește participația volumică a oxigenului cu valoarea presiunii din butelie/buteliile de stocare ale amestecului și se obține astfel valoarea presiunii parțiale a oxigenului.
- Se împarte valoarea rezultată din etapa de calcul anterioară la participația volumică a oxigenului dorită și se obține presiunea finală care se realizează prin adăugarea de gaz inert.
- Se adaugă gaz inert până ce se atinge valoarea dorită a presiunii.
- Se așteaptă stabilizarea valorii temperaturii și presiunii conform indicațiilor prezentate anterior, urmând, dacă este cazul, să se adauge gaz inert.

Exprimarea în formă matematică a etapelor descrise este:

$$p_f = \frac{p_i \left(r_{Ox}\right)_i}{\left(r_{Ox}\right)_f} \tag{5.11}$$

în care: p_f este presiunea finală din butelie/butelii; p_i - presiunea inițială din butelie/butelii; $\left(r_{Ox}\right)_i$ - participația volumică înițială a oxigenului; $\left(r_{Ox}\right)_f$ - participația volumică finală a oxigenului.

Aceste etape de preparare sunt aplicate indiferent de modul de realizare a transferului între butelii. Alimentarea cu amestec respirator a buteliei de stocare poate fie făcută direct, fie cu ajutorul unui surpresor, dacă presiunea din butelia de alimentare este redusă. Această din urmă soluție face ca întreaga cantitate de gaz să poată fi folosită, îndiferent de valoarea presiunii din butelia de stocare a gazelor folosite la prepararea amestecului.

Referitor la operațiunile de preparare a amestecurilor respiratorii și stocarea acestora în recipienți, trebuie precizat că în conformitate cu legile care guvernează amestecarea gazelor sub presiune, în timpul compresiei temperatura gazului în recipient crește. Cu cât viteza compresiei este mai mare cu atât mai mare este temperatura gazului. În aceste condiții masa de gaz introdusă în recipient este mai mică decât în cazul în care procesul ar fi izotermic. În lucrările de specialitate, se precizază că, în astfel de situații, pentru amestecurile realizate cu urmărirea presiunii din recipient, este interzisă efectuarea unor corecții ulterioare.

Deoarece gazele implicate în procesul de amestecare nu sunt perfecte, chiar și în cazul unor procese izotermice pot apărea neconcordanțe. Când amestecarea gazelor are loc la temperatura camerei și la presiuni relativ mici aceste abateri sunt neglijabile. Aceste abateri nu sunt neglijabile atunci când procesul de amestecare are loc la presiuni mari și în recipienți cu volume mici.

5.7. Omogenizarea amestecurilor de gaze

La fabricarea amestecurilor respiratorii o problemă deosebit de importantă o reprezintă omogenizarea amestecului de gaze, care se produce, pe de o parte, prin fenomenul de difuzie moleculară și, pe de altă parte, prin fenomenul de difuzie turbulentă specifică turbulenței jetului creat la injecția gazului în recipientul cu amestec. Ținând cont de teoriile din literatura de specialitate, se poate spune că difuzia unui gaz este cu atât mai mare cu cât viteza și traiectoria liberă a moleculelor sunt mai mari.

În tabelul 5.3 sunt prezentați coeficienții de difuzie ai câtorva gaze din aer la temperatura de 0^0C.

Tabelul 5.3 Coeficienții de difuzie ai câtorva gaze din aer la 0^0C

Gaz	Coeficienții de difuzie [cm^2/s]	Observații
CO_2	0,139	Winkelmann
H_2	0,634	Obermayer
O_2	0,178	Obermayer

În prezent, cea mai folosită tehnică de omogenizare a amestecurilor de gaze este agitația mecanică (rotirea buteliei). În aceste noi condiții, la o turație de 10 până la 20 rot/min, omogenizarea amestecului argon-dioxid de carbon ($r_{\mathrm{Ar}} = 0{,}75$, $r_{\mathrm{CO_2}} = 0{,}25$), prezentat mai sus, are loc în 1,5 ore. Metoda agitației mecanice este obligatorie când se execută amestecuri în volume mici.

Făcând apel la legile care guvernează amestecarea gazelor sub presiune, trebuie menționate două probleme importante. Astfel, în timpul compresiei temperatura gazului în recipient crește și cu cât viteza compresiei este mai mare cu atât temperatura gazului este mai mare. În acest caz masa de gaz introdusă în recipient este mai mică decât în cazul în care procesul ar fi izotermic. În astfel de situații, pentru amestecurile realizate cu urmărirea presiunii din recipient, este interzisă efectuarea unor corecții ulterioare. Chiar și în cazul unor procese izotermice pot apărea neconcordanțe datorită faptului că gazele nu sunt perfecte. Totuși, abaterile sunt neglijabile atunci când amestecarea gazelor are loc la temperatura camerei și la presiuni relativ mici (vezi procesele de compresie pe timpul scufundărilor în saturație când amestecarea gazelor este locală, având loc chiar pe timpul procesului compresiei). Abaterile nu sunt neglijabile atunci când procesul de amestecare are loc la presiuni mari și în recipiente cu volume mici.

5.8. Înlocuirea amestecurilor respiratorii

Când azotul din gazul respirat este înlocuit cu heliu, acesta din urmă este absorbit de plămâni și simultan azotul este eliminat. Între alveole și sânge și între sânge și țesuturile organismului are loc o difuzie în contracurent a gazelor.

Amestecul respirator HELIOX poate fi respirat timp îndelungat, fără ca organismul să fie afectat. În acest timp, organismul se saturează cu heliu și țesuturile sale sunt spălate complet de azot.

Neonul nu este mai ușor decât azotul, dar este mai solubil decât heliul. Argonul este nepotrivit pentru a înlocui azotul din cauza solubilității sale mari în soluții apoase sau grăsimi.

În practică se folosește metoda schimbării amestecurilor respiratorii chiar pe timpul decompresiei. Spre exemplu, în cazul decompresiei după o scufundare cu amestec respirator HELIOX, decompresie îngreunată de numeroase accidente osteo-articulare, se recomandă ca de la 10 m adâncime, spre suprafață, să se înlocuiască amestecul HELIOX cu aer. Această înlocuire avantajează desaturarea mai rapidă a țesuturilor de gazul inert care inițial a fost heliul. Prin urmare, schimbarea amestecurilor respiratorii favorizează executarea mai rapidă a decompresiei.

Un exemplu edificator în ceea ce privește înlocuirea amestecurilor respiratorii pentru scurtarea decompresiei, este reprezentat în figura 5.19.

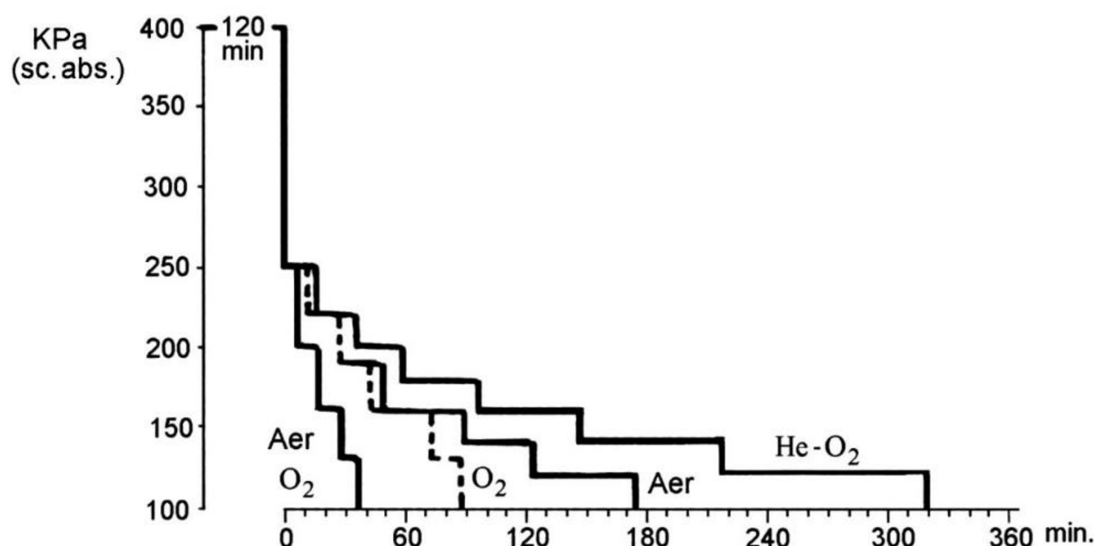


Figura 5.19 Profilul decompresiei după o scufundare cu amestec HELIOX timp de 120 min., utilizând diferite amestecuri respiratorii (după A. A. Bühlmann)

Se observă diferențe foarte mari, funcție de amestecurile respiratorii utilizate, micșorându-se decompresia de la aproximativ 316 minute la numai 35 minute. Se consideră o scufundare cu amestec respirator HELIOX la adâncimea de 30 m [4 bar (sc. abs.) = 400 KPa (sc. abs.)] cu durata lucrului în imersiune de 120 minute. Dacă decompresia s-ar executa cu același amestec respirator HELIOX, durata acesteia va fi de 316 minute. Dacă se schimbă amestecul respirator la primul palier de decompresie cu aer, durata decompresiei se reduce la 170 minute. Dacă în loc de aer se respiră oxigen pur, decompresia se reduce la 83 minute. Cea mai rapidă decompresie se obține dacă se schimbă amestecul HELIOX cu aer, după 45 minute de la începerea scufundării, iar la

decompresie se respiră oxigen încă de la primul palier. În acest caz decompresia va dura numai 35 minute.

Acest sistem de revenire rapidă la presiunea atmosferică se practică numai în cazuri de strictă necesitate, când asupra scafandrului este obligatorie o intervenție de securitate la presiunea atmosferică.

6

INSTALAȚIE PENTRU PREPARAREA ÎN FLUX CONTINUU A AMESTECURILOR GAZOASE RESPIRATORII, CU POSIBILITATEA LIVRĂRII DIRECTE SPRE CONSUMATOR. CONCEPT ȘI PRINCIPII GENERALE DE FUNCȚIONARE

Instalația prezentată în capitolul de față, este de concepție originală, propusă de autorii acestei cărți și are ca particularitate posibilitatea fabricării imediate a oricăror amestecuri gazoase respiratorii indiferent de concentrațiile componentelor impuse de tehnologia de scufundare.

Pornind de la metodele expuse în capitolul cinci al lucrării de față, instalația se încadrează în categoria celor destinate preparării în flux continuu a amestecurilor gazoase respiratorii, sintetice, binare sau ternare, folosite în domeniul scufundărilor profesionale, industriale sau militare. Fabricarea amestecului dorit se face prin amestecarea în proporția dorită, a gazelor pure aflate stocate distinct în butelii.

Principiul de realizare al amestecurilor gazoase într-o astfel de instalație constă în asigurarea și controlul debitelor prin prevederea unor sisteme de injectare la debit masic constant a componentelor. Aceasta presupune asigurarea, pentru fiecare gaz component, a injectării unui debit masic invariabil în raport cu presiunea amestecului gazos dintr-o incintă presurizată (debit masic constant), concomitent cu asigurarea posibilității controlului permanent al acestui debit masic. Instalația livrează așadar un debit masic invariabil de amestec gazos, indiferent de valoarea presiunii gazelor din interiorul incintei de stocare. Totodată, există posibilitatea controlului permanent al debitului masic injectat.

Instalația pentru prepararea amestecurilor respiratorii propusă, se deosebește de instalațiile existente prin următoarele particularități:

- asigură prepararea prin injectare simultană a gazelor componente ce formează amestecul;
- dă posibilitatea livrării către consumator a amestecului format concomitent cu injectarea gazelor componente și implicit cu prepararea propriu zisă;
- nu necesită înmagazinarea amestecului spre a fi livrat consumatorului;
- nu necesită existența unor spații de stocare a amestecurilor;

- asigură posibilitatea modificării imediate a rapoartelor concentrațiilor gazelor componente ce formează amestecul și posibilitatea livrării imediate a noului amestec;
- presupune doar metode de preparare bazate pe fenomene hidraulice;
- cuprinde elemente componente ale dispozitivelor de injecție ce nu conțin piese mecanice, electronice sau electromecanice care se pot deteriora cu sau fără o avertizare prealabilă.

Având în vedere particularitățile instalației de preparare a amestecurilor respiratorii, aceasta poate fi adaptată în vederea livrării amestecului gazos atât pentru aparate de respirat sub apă cât și pentru barocamere.

În funcție de numărul de componente din care urmează să fie preparat amestecul respirator, și anume amestec binar (HELIOX, NITROX) sau ternar (TRIMIX), instalația este alcătuită din două sau respectiv trei linii de distribuție-injectare, sau în cazul unei structuri complexe, are active două sau trei linii de distribuție-injectare.

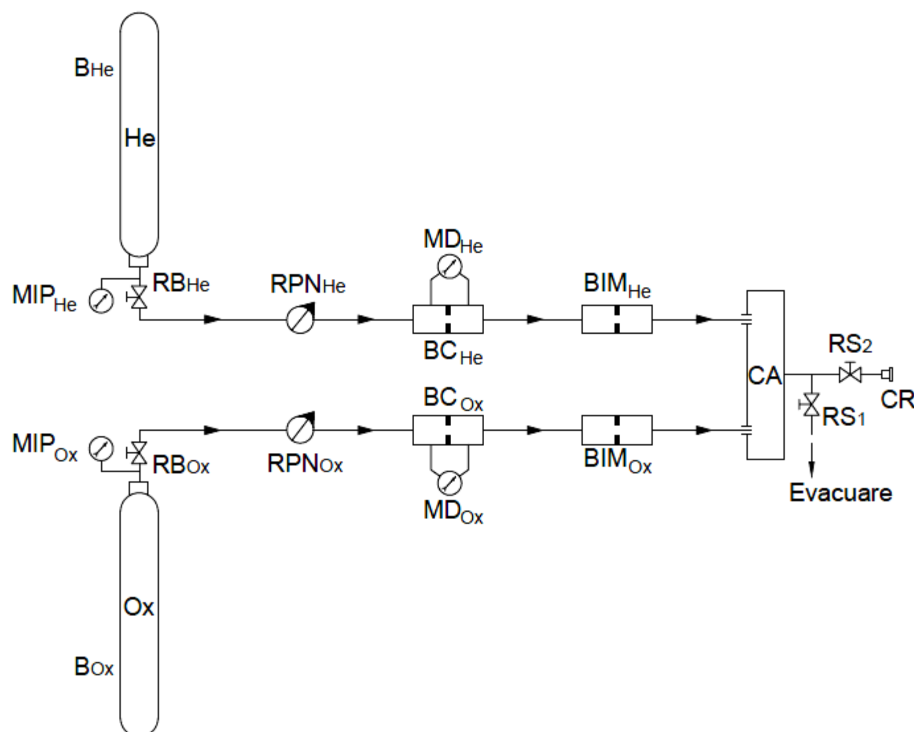
6.1 DESCRIEREA INSTALAȚIEI PENTRU PREPARAREA AMESTECURILOR BINARE HELIOX

Alcătuirea constructivă a instalației destinată preparării amestecului binar HELIOX este prezentată în figura 6.1. Aceasta este alcătuită din două linii separate pentru distribuția și injectarea gazelor. Fiecare dintre linii este dedicată unei singure componente ce formează amestecul, heliu sau oxigen.

Gazele pure sunt stocate individual, la o anumită presiune, în butelii conectate fiecare la linia corespunzătoare de distribuție-injectare. Ulterior formării amestecului respirator, acesta este distribuit spre consumator.

Linia pentru distribuția și injectarea heliului este alimentată din butelia de stocare B_{He} în care se găsește înmagazinat, la o anumită presiune, gazul. Alimentarea acestui circuit se face prin intermediul robinetului RB_{He}. Presiunea la care este furnizat gazul în circuit este măsurată cu ajutorul manometrului de înaltă presiune MIP_{He}.

Deoarece heliul este introdus în circuit la presiune înaltă, s-a prevăzut un reductor de presiune nepilotat RPN_{He} ce are ca referință presiunea atmosferică. Acest dispozitiv are rolul de a reduce presiunea de la nivelul valorii pe care gazul o are în butelie la nivelul presiunii medii necesară alimentării blocului de control BC_{He}. Blocul de control este prevăzut cu un microajutaj cilindric ce lucrează în domeniul subsonic. Pentru măsurarea diferenței de presiune Δp_{He} apărută la trecerea fluidului prin microajutaj, s-a prevăzut un manometru diferențial MD_{He}. Conectarea acestui manometru diferențial la blocul de control se face prin intermediul unor furtunuri conectate la două prize de presiune una situată în amonte și cealaltă în aval de ajutajul cilindric din blocul de control BC_{He}.



LEGENDA: B – butelie; MIP – manometru de înaltă presiune; RB – robinet butelie; RPN – reductor de presiune nepilotat; MD – manometru diferențial; BC – bloc de control; BIM – bloc injecție masică; CA – cameră de amestec; RS – robinet sferic; CR – cuplaj rapid

NOTĂ: Indicii Ox și He se referă la oxigen și respectiv la heliu

Figura 6.1 Alcătuirea instalației cu injecție masică pentru prepararea amestecului binar HELIOX

Blocul de injecție masică a heliului BIM_{He} se află montat în aval de blocul de control BC_{He}. Acesta este prevăzut cu un microajutaj convergent ce lucrează în domeniul sonic (critic).

Linia pentru distribuția și injectarea heliului alimentează camera de amestec CA a instalației în care are loc amestecarea cu oxigenul și formarea amestecului respirator sintetic HELIOX. Așadar, concomitent alimentării cu heliu, are loc în mod asemănător și injectarea în camera de amestec CA a oxigenului. Ambele gaze sunt distribuite cu parametrii necesari formării unui amestec HELIOX având caracteristici prestabilite.

Distribuția și injectarea oxigenului în camera de amestec a instalației se produce în mod similar cu cea a heliului. Linia destinată acestui gaz este alimentată cu oxigen dintr-o butelie de stocare B_{Ox} în care gazul se află înmagazinat sub presiune.

Prin acționarea robinetului RB_{Ox} se asigură, pe linia de oxigen, debitul de oxigen utilizat în final formării amestecului HELIOX. Valoarea presiunii gazului la ieșirea din butelia de stocare este citită la manometrul de înaltă presiune MIP_{Ox}. Pentru modificarea presiunii de la valori înalte (presiunea de înmagazinare) la valori medii, s-a prevăzut un reductor de presiune nepilotat

RPN_{Ox} având ca referință presiunea atmosferică. Oxigenul, după ce trece prin reductorul de presiune RPN_{Ox}, tranzitează blocul de control prevăzut cu un microajutaj cilindric, subsonic. Diferența de presiune apărută la trecerea fluidului prin microajutaj este urmărită prin intermediul manometrului diferențial MD_{Ox}.

Blocul de control pentru oxigen BC_{Ox} este succedat de blocul de injecție masică BIM_{Ox}. Funcționarea în regim sonic (critic) a acestui bloc de injecție masică al instalației este asigurată de un ajutaj convergent, ce asigură, în condițiile mișcării permanente, furnizarea către camera de amestec CA a unui debit masic constant de oxigen.

Amestecul respirator sintetic HELIOX, realizat în camera de amestec ca urmare a injectării controlate, la debit masic constant, a celor două gaze componente (heliu și oxigen), este livrat consumatorului prin intermediul unui aparat destinat scufundărilor autonome sau, așa cum este în cazul scufundărilor de sistem, este folosit în presurizarea unei barocamere.

De-a lungul instalației de preparare a amestecului HELIOX unele din mărimile fizice determinante ale celor două gaze componente se modifică. În aceste condiții, în camera de amestec valorile acestor mărimi vor fi diferite față de cele din buteliile de stocare.

În figura 6.2 este redată corelarea dintre etapele parcurse de cele două gaze în lungul circuitului și modificarea, în consecință, a mărimilor caracteristice ale acestora.

Heliul este stocat în butelia corespunzătoare la presiunea $p_{B,He}$, are temperatura absolută $T_{B,He}$, volumul $V_{B,He}$, și cantitatea utilizabilă de gaz $C_{U,He}$. Alimentarea liniei heliului se face la debitul masic $Q_{m,He}^{inj}$ și la presiunea $p_{B,He}$, egală cu valoarea presiunii la ieșirea din butelia de stocare.

Prin prezența reductorului de presiune nepilotat RPN_{He} presiunea este modificată de la valoarea $p_{B,He}$, presiune înaltă la care gazul este stocat în butelie, la valoarea medie $p_{0,He} + \Delta p_{df,He}$. Astfel, parametrii gazului influent în amonte de blocul de control BC_{He} sunt presiunea la valoare medie precizată anterior, debitul masic injectat $Q_{m,He}^{inj}$ și temperatura absolută $T_{0,He}$. La ieșirea din blocul de control BC_{He} și intrarea în blocul de injecție masică BI_{He}, parametrii gazului sunt $Q_{m,He}^{inj}$, $T_{0,He}$, și $p_{0,He}$. La ieșirea din BI_{He}, parametrii gazului sunt $Q_{m,He}^{inj}$ și $p_{e,He}$. Aceștia se regăsesc în lungul liniei heliului până la intrarea în camera de amestec.

Parametrii de interes ai oxigenului stocat în butelie sunt presiunea $p_{B,Ox}$, temperatura absolută $T_{B,Ox}$, volumul $V_{B,Ox}$ și cantitatea utilizabilă de gaz $C_{U,Ox}$. Astfel, în amonte de reductorul de presiune nepilotat RPN_{Ox} debitul oxigenului este $Q_{m,Ox}^{inj}$, furnizat la presiunea $p_{B,Ox}$, iar în aval de acesta, debitul

masic influent în blocul de control BCOx este $Q^{\text{inj}}_{\text{m,Ox}}$, la presiunea $p_{0,\text{Ox}} + \Delta p_{\text{df,Ox}}$.

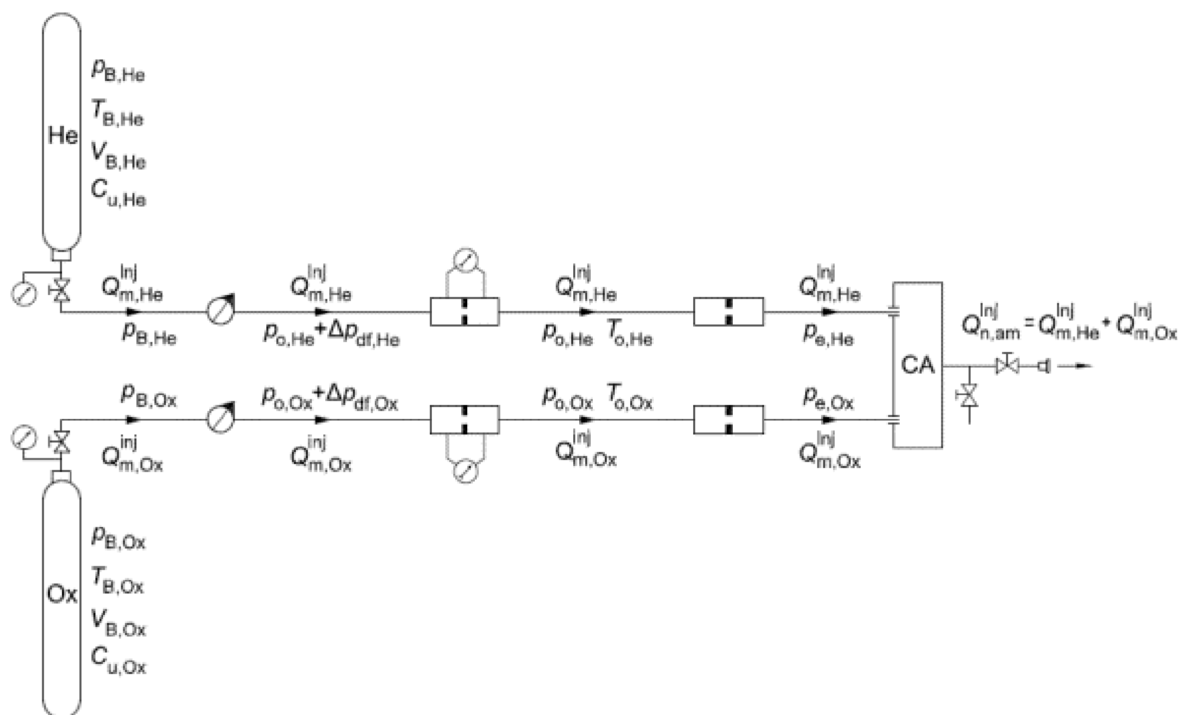


Figura 6.2 Parametrii gazelor componente, heliu (He) și oxigen (Ox) și ai amestecului gazos HELIOX în lungul instalației de preparare a amestecului binar

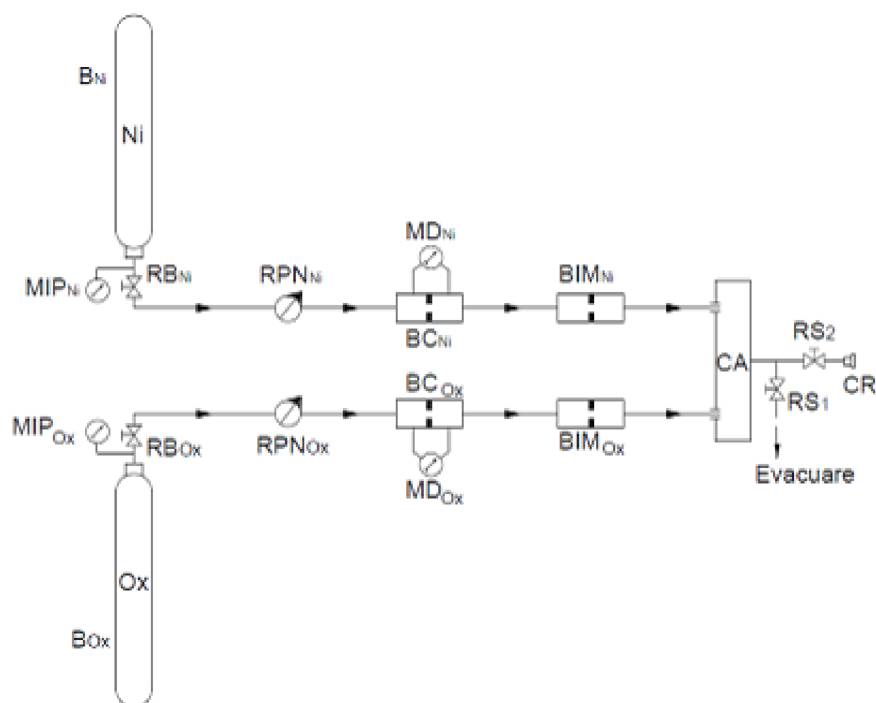
Alimentarea cu oxigen a blocului de control BCOx se realizează așadar cu parametrii gazului rezultați în urma reducerii presiunii. Efluentul acestuia va alimenta blocul de injecție masică BIMOx la debitul $Q^{\text{inj}}_{\text{m,Ox}}$, la presiunea $p_{0,\text{Ox}}$ și temperatura absolută $T_{0,\text{Ox}}$. Ulterior asigurării unui debit invariabil în timp, ca urmare a prezenței BIMOx, oxigenul este injectat în camera de amestec la debitul $Q^{\text{inj}}_{\text{m,Ox}}$, și la presiunea $p_{\text{e,Ox}}$.

Livrarea amestecului HELIOX către consumator se face la debit masic constant, rezultat prin amestecarea celor două gaze: $Q^{\text{inj}}_{\text{m,am}} = Q^{\text{inj}}_{\text{m,He}} + Q^{\text{inj}}_{\text{m,Ox}}$. În ceea ce privește presiunea de livrare a amestecului HELIOX, aceasta este egală cu cea a gazului de pe fiecare linie în amonte de camera de amestec $\left(p_{\text{e,He}} = p_{\text{e,Ox}}\right)$.

6.2 DESCRIEREA INSTALAȚIEI PENTRU PREPARAREA AMESTECURILOR BINARE NITROX

Pentru prepararea amestecurilor binare NITROX este propusă o instalație cu un sistem de injecție la debit masic constant, similară celei descrise în paragraful anterior. Aceasta este prezentată schematic în figura 6.3.

Stocarea celor două gaze, azot respectiv oxigen se face individual în butelii distincte, notate conform figurii 6.3 ca B_{Ni}, butelia corespunzătoare azotului, respectiv B_{Ox}, cea pentru oxigen.



LEGENDA: B – butelie; MIP – manometru de înaltă presiune; RB – robinet butelie; RPN – reductor de presiune nepilotat; MD – manometru diferențial; BC – bloc de control; BIM – bloc injecție masică; CA – cameră de amestec; RS – robinet sferic; CR – cuplaj rapid

NOTĂ: Indicii Ox și Ni se referă la oxigen și respectiv la azot

Figura 6.3 Alcătuirea instalației cu injecție masică pentru prepararea amestecului binar NITROX

Linia pentru distribuția și injectarea azotului este alimentată din butelia de stocare B_{Ni} în care se găsește înmagazinat, la o anumită presiune, gazul. Alimentarea acestui circuit se face prin intermediul robinetului RB_{Ni}. Presiunea la care este furnizat gazul în circuit este măsurată cu ajutorul manometrului de înaltă presiune MIP_{Ni}.

Deoarece azotul este introdus în circuit la presiune înaltă, s-a prevăzut un reductor de presiune nepilotat RPN_{Ni} ce are ca referință presiunea atmosferică. Acest dispozitiv are rolul de a reduce presiunea de la nivelul valorii pe care gazul o are în butelie la nivelul presiunii medii necesară alimentării blocului de control

BC_{Ni}. Blocul de control este prevăzut cu un microajutaj cilindric ce lucrează în domeniul subsonic. Pentru măsurarea diferenței de presiune Δp_{Ni} apărută la trecerea fluidului prin microajutaj, s-a prevăzut un manometru diferențial MD_{Ni}. Conectarea acestui manometru diferențial la blocul de control se face prin intermediul unor furtunuri conectate la două prize de presiune una situată în amonte și cealaltă în aval de ajutajul cilindric din blocul de control BC_{Ni}.

Distribuția și dozarea celor două gaze componente se face separat prin două linii, una destinată azotului și cealaltă oxigenului.

Blocul de injecție masică a azotului BIM_{Ni} se află montat în aval de blocul de control BC_{Ni}. Acesta este prevăzut cu un microajutaj convergent ce lucrează în domeniul sonic (critic).

Linia pentru distribuția și injectarea azotului alimentează camera de amestec CA a instalației în care are loc amestecarea cu oxigenul și formarea amestecului respirator sintetic NITROX. Așadar, concomitent alimentării cu azot, are loc în mod asemănător și injectarea în camera de amestec CA a oxigenului. Ambele gaze sunt distribuite cu parametrii necesari formării unui amestec NITROX având caracteristici prestabilite.

Distribuția și injectarea oxigenului în camera de amestec a instalației se produce în mod similar cu cea a azotului. Linia destinată acestui gaz este alimentată cu oxigen dintr-o butelie de stocare B_{Ox} în care gazul se află înmagazinat sub presiune.

Prin acționarea robinetului RB_{Ox} se asigură, pe linia de oxigen, debitul de oxigen utilizat în final formării amestecului NITROX. Valoarea presiunii gazului la ieșirea din butelia de stocare este citită la manometrul de înaltă presiune MIP_{Ox}. Pentru modificarea presiunii de la valori înalte (presiunea de înmagazinare) la valori medii, s-a prevăzut un reductor de presiune nepilotat RPN_{Ox} având ca referință presiunea atmosferică. Oxigenul după ce trece prin reductorul de presiune RPN_{Ox}, tranzitează blocul de control prevăzut cu un microajutaj cilindric, subsonic. Diferența de presiune apărută la trecerea fluidului prin microajutaj este urmărită prin intermediul manometrului diferențial MD_{Ox}.

Blocul de control pentru oxigen BC_{Ox} este succedat de blocul de injecție masică BIM_{Ox}. Funcționarea în regim sonic (critic) a acestui subansamblu al instalației este asigurată de un ajutaj convergent, ce asigură, în condițiile mișcării permanente, furnizarea către camera de amestec CA a unui debit masic constant de oxigen.

Amestecul respirator sintetic NITROX, realizat în camera de amestec ca urmare a injectării controlate, la debit masic constant, a celor două gaze componente (azot și oxigen), este livrat consumatorului prin intermediul unui aparat destinat scufundărilor autonome sau, așa cum este în cazul scufundărilor de sistem, este folosit în presurizarea unei barocamere.

De-a lungul instalației de preparare a amestecului NITROX unele din mărimile fizice determinante ale celor două gaze componente se modifică. În aceste condiții, în camera de amestec valorile acestor mărimi vor fi diferite față de cele din buteliile de stocare.

În figura 6.4 este redată corelarea dintre etapele parcurse de cele două gaze în lungul circuitului și modificarea, în consecință, a mărimilor caracteristice ale acestora.

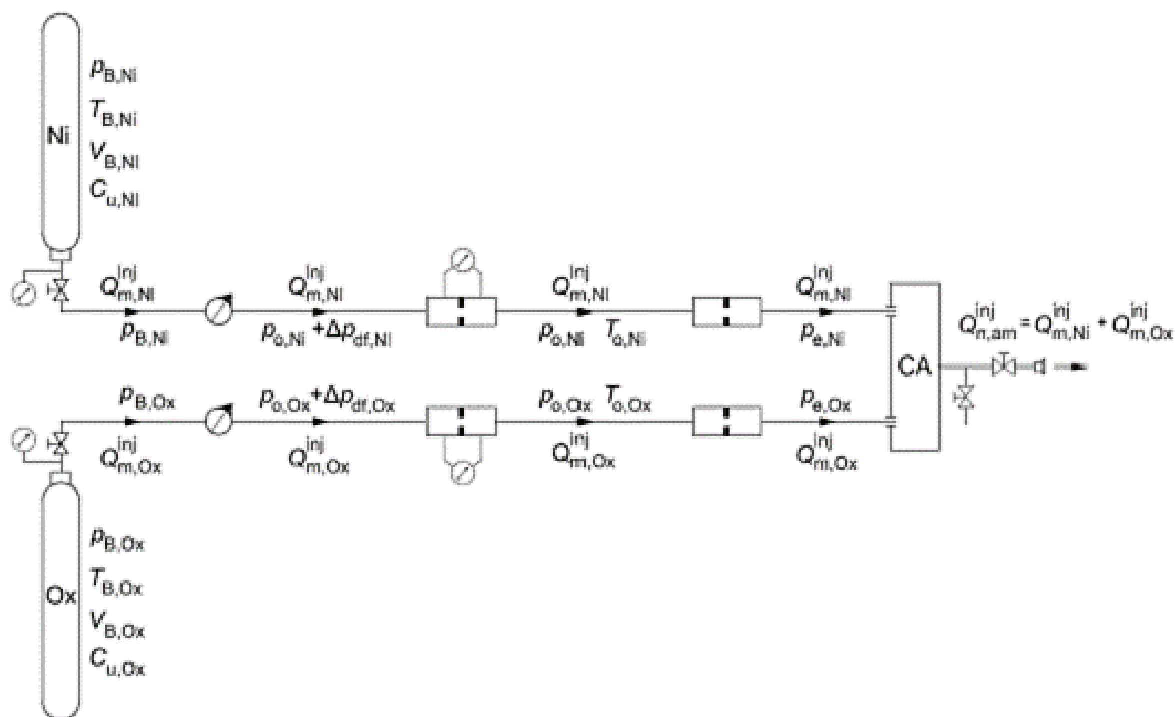


Figura 6.4 Parametrii gazelor componente, azot (Ni) și oxigen (Ox) și ai amestecului gazos NITROX în lungul instalației de preparare a amestecului binar

Azotul este stocat în butelia corespunzătoare la presiunea $p_{B,Ni}$, are temperatura absolută $T_{B,Ni}$, volumul $V_{B,Ni}$, și cantitatea utilizabilă de gaz $C_{U,Ni}$. Alimentarea liniei azotului se face la debitul masic $Q^{inj}_{m,Ni}$ și la presiunea $p_{B,Ni}$, egală cu valoarea presiunii la ieșirea din butelia de stocare.

Prin prezența reductorului de presiune nepilotat RPN$_{Ni}$ presiunea este modificată de la valoarea $p_{B,Ni}$, presiune înaltă la care gazul este stocat în butelie, la valoarea medie $p_{0,Ni}+\Delta p_{df,Ni}$. Astfel, parametrii gazului influent în amonte de blocul de control BC$_{Ni}$ sunt presiunea la valoare medie precizată anterior, debitul masic injectat $Q^{inj}_{m,Ni}$ și temperatura absolută $T_{0,Ni}$. La ieșirea din blocul de control BC$_{Ni}$ și intrarea în blocul de injecție masică BI$_{Ni}$, parametrii gazului sunt $Q^{inj}_{m,Ni}$, $T_{0,Ni}$ și $p_{0,Ni}$. La ieșirea din BI$_{Ni}$, parametrii gazului sunt $Q^{inj}_{m,Ni}$ și $p_{e,Ni}$. Aceștia se regăsesc în lungul liniei azotului până la intrarea în camera de amestec.

Parametrii de interes ai oxigenului stocat în butelie sunt presiunea $p_{\mathrm{B,Ox}}$, temperatura absolută $T_{\mathrm{B,Ox}}$, volumul $V_{\mathrm{B,Ox}}$ și cantitatea utilizabilă de gaz $C_{\mathrm{U,Ox}}$. Astfel în amonte de reductorul de presiune nepilotat RPN$_{Ox}$ debitul oxigenului este $Q_{\mathrm{m,Ox}}^{\mathrm{inj}}$, furnizat la presiunea $p_{\mathrm{B,Ox}}$, iar în aval de acesta, debitul masic influent în blocul de control BC$_{Ox}$ este $Q_{\mathrm{m,Ox}}^{\mathrm{inj}}$, la presiunea $p_{\mathrm{0,Ox}} + \Delta p_{\mathrm{df,Ox}}$.

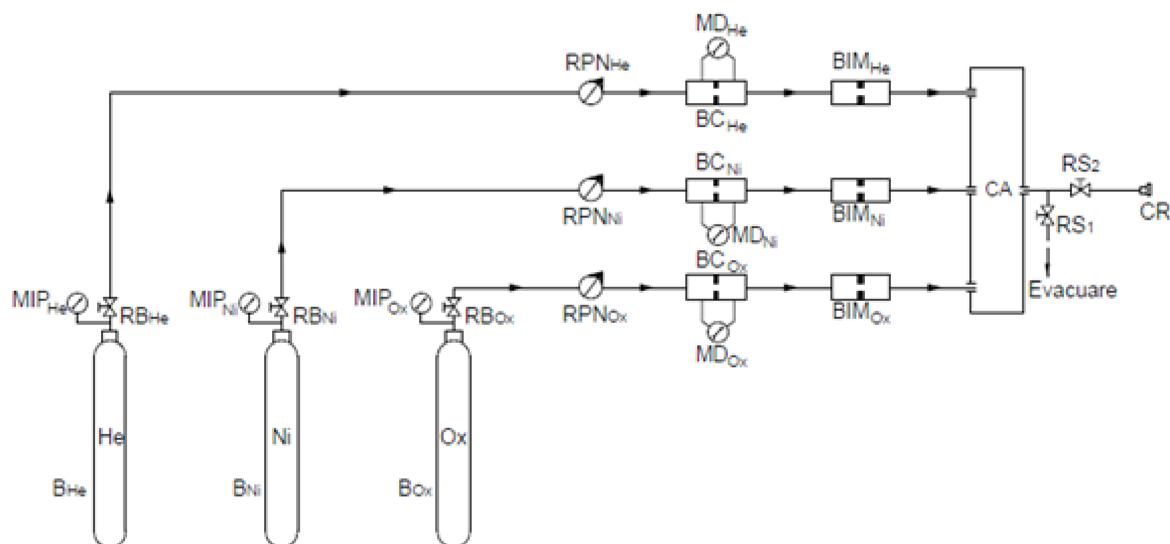
Alimentarea cu oxigen a blocului de control BC$_{Ox}$ se realizează așadar cu parametrii gazului rezultați în urma reducerii presiunii. Efluentul acestuia va alimenta blocul de injecție masică BIM$_{Ox}$ la debitul $Q_{\mathrm{m,Ox}}^{\mathrm{inj}}$, la presiunea $p_{\mathrm{0,Ox}}$ și temperatura absolută $T_{\mathrm{0,Ox}}$. Ulterior asigurării unui debit invariabil în timp, ca urmare a prezenței BIM$_{Ox}$, oxigenul este injectat în camera de amestec la debitul $Q_{m,Ox}^{inj}$și la presiunea $p_{\mathrm{e,Ox}}$.

Livrarea amestecului NITROX către consumator se face la debit masic constant, rezultat prin amestecarea celor două gaze: $Q_{\mathrm{m,am}}^{\mathrm{inj}} = Q_{\mathrm{m,Ni}}^{\mathrm{inj}} + Q_{\mathrm{m,Ox}}^{\mathrm{inj}}$. În ceea ce privește presiunea de livrare a amestecului NITROX, aceasta este egală cu cea a gazului de pe fiecare linie în amonte de camera de amestec $\left(p_{\mathrm{e,Ni}} = p_{\mathrm{e,Ox}}\right)$.

6.3 DESCRIEREA INSTALAȚIEI PENTRU PREPARAREA AMESTECURILOR TERNARE TRIMIX

Pentru amestecarea, în proporții diferite, a trei gaze de exemplu heliu, azot și oxigen, în vederea formării unui amestec respirator ternar, instalația propusă este alcătuită din trei linii distincte (figura 6.5). Prin fiecare dintre acestea sunt transportate, independent, cele trei gaze componente folosite pentru formarea amestecului.

Alimentarea instalației cu heliu se face prin deschiderea robinetului RB$_{He}$. Presiunea de livrare a gazului este verificată prin citirea valorii indicate de manometrul MIP$_{He}$. În aval de robinetul RB$_{He}$ este prevăzut un reductor de presiune nepilotat RPN$_{He}$. Rolul acestuia este de a modifica valoarea presiunii de la valori ce se încadrează în treapta de presiune înaltă la valori medii. Monitorizarea presiunii gazului după schimbarea treptei de presiune se realizează prin intermediul blocului de control BC$_{He}$, element la care este conectat manometrul diferențial MD$_{He}$. Ultimul element din alcătuirea liniei heliului îl reprezintă blocul de injecție masică BIM$_{He}$. Acesta asigură injectarea în camera de amestec CA a unui debit masic constant de heliu.



LEGENDA: B – butelie; MIP – manometru de înaltă presiune; RB – robinet butelie; RPN – reductor de presiune nepilotat; MD – manometru diferențial; BC – bloc de control; BIM – bloc injecție masică; CA – cameră de amestec; RS – robinet sferic; CR – cuplaj rapid

NOTĂ: Indicii He, Ni și Ox se referă la heliu, azot și respectiv la oxigen

Figura 6.5 Alcătuirea instalației cu injecție masică pentru prepararea amestecului ternar TRIMIX

Linia azotului este alcătuită din elemente similare celor care compun linia heliului. Astfel presiunea la care azotul este stocat în butelia B_{Ni}, și care reprezintă și presiunea de alimentare, este verificată cu ajutorul manometrului de înaltă presiune MIP_{Ni}. Trecerea de la treapta presiunilor înalte la valori medii este asigurată de reductorul de presiune nepilotat RPN_{Ni}, iar ansamblul format din blocul de control BC_{Ni} și manometrul diferențial MD_{Ni} poziționate în aval, facilitează determinarea debitului de azot pe această linie. Alimentarea cu azot la debit masic constant a camerei de amestec CA este asigurată de blocul de injecție masică BIM_{Ni}.

Circuitul de injecție al oxigenului este alcătuit dintr-un regulator de presiune nepilotat RPN_{Ox} având ca referință presiunea atmosferică. Rolul regulatorului este de a reduce presiunea de la nivelul presiunii înalte existente în butelia de stocare B_{Ox} la cel al presiunii medii necesară alimentării blocului de control BC_{Ox} și în continuare, a blocului de injecție masică BIM_{Ox}. Pentru verificarea valorii presiunii, atât la ieșirea din butelia de stocare și implicit în secțiunea de alimentare a circuitului cât și în amonte de BIM_{Ox} au fost prevăzute manometre. Primul dintre acestea este un manometru de înaltă presiune MIP_{Ox}, iar cel de al doilea este un manometru diferențial MD_{Ox} asociat blocului de control BC_{Ox}, amplasat între reductorul de presiune RPN_{Ox} și blocul de injecție masică BIM_{Ox}.

Toate cele trei linii converg către camera de amestec CA unde are loc prepararea propriu zisă a amestecului respirator TRIMIX.

Cele trei gaze se află stocate separat în butelii, la valori ridicate ale presiunii p_{B}, ocupând volumul V_{B}, la temperatura T_{B} și având cantitatea utilizabilă de gaz C_{U} (figura 6.6). Aceste valori se modifică în lungul celor trei linii.

Heliul este injectat în instalație la debitul $Q_{\mathrm{m,He}}^{\mathrm{inj}}$, valoare ce este menținută constantă de-a lungul liniei. În ceea ce privește temperatura de înmagazinare a gazului $T_{\mathrm{B,He}}$, și temperatura pe care acesta o are în lungul circuitului, temperaturi absolute, nu există diferențe notabile. După secțiunea de alimentare valoarea acestei mărimi fizice poate fi considerată constantă, $T_{0,\mathrm{He}}$.

Presiunea, fiind parametrul asupra căruia se intervine pentru asigurarea unui debit masic constant, înregistrează modificări semnificative de-a lungul parcursului său în instalație. Presiunea de stocare a heliului în butelie, notată $p_{\mathrm{B,He}}$, se încadrează în categoria presiunilor înalte. După reductorul de presiune, această valoare este redusă la o valoare medie, de utilizare, $p_{0,\mathrm{He}} + \Delta p_{\mathrm{df,He}}$. Măsurarea debitului de heliu injectat, realizată așa cum s-a specificat anterior prin intermediului ansamblului bloc de control $\mathrm{BC_{He}}$ – manometru diferențial $\mathrm{MD_{He}}$, are ca rezultat o nouă scădere a valorii presiunii de la valoarea medie notată $p_{0,\mathrm{He}} + \Delta p_{\mathrm{df,He}}$ la valoarea $p_{0,\mathrm{He}}$. O a treia modificare se produce în aval ca urmare a prezenței blocul de injecție masică $\mathrm{BIM_{He}}$. Valoarea presiunii heliului la ieșirea din acest element al instalației și implicit în secțiunea de injectare în camera de amestec este notată conform schemei din figura 6.6. cu $p_{\mathrm{e,He}}$.

Urmărind parcursul gazelor componente, redat în figura 6.5, se observă modificările parametrilor determinanți pentru formarea amestecului ternar.

Azotul este injectat în instalație la debitul $Q_{\mathrm{m,Ni}}^{\mathrm{inj}}$, valoare ce este menținută constantă de-a lungul liniei. În ceea ce privește temperatura de înmagazinare a gazului $T_{\mathrm{B,Ni}}$, și temperatura pe care acesta o are în lungul circuitului, temperaturi absolute, nu există diferențe notabile. După secțiunea de alimentare valoarea acestei mărimi fizice poate fi considerată constantă, $T_{0,\mathrm{Ni}}$.

Presiunea, fiind parametrul asupra căruia se intervine pentru asigurarea unui debit masic constant, înregistrează modificări semnificative de-a lungul parcursului său în instalație. Presiunea de stocare a azotului în butelie, notată $p_{\mathrm{B,Ni}}$, se încadrează în categoria presiunilor înalte. După reductorul de presiune, această valoare este redusă la o valoare medie, de utilizare, $p_{0,\mathrm{Ni}} + \Delta p_{\mathrm{df,Ni}}$. Măsurarea debitului de azot injectat, realizată așa cum s-a specificat anterior prin intermediului ansamblului bloc de control $\mathrm{BC_{Ni}}$ – manometru diferențial $\mathrm{MD_{Ni}}$, are ca rezultat o nouă scădere a valorii presiunii de

la valoarea medie notată $p_{0,\mathrm{Ni}}+\Delta p_{\mathrm{df,Ni}}$ la valoarea $p_{0,\mathrm{Ni}}$. O a treia modificare se produce în aval ca urmare a prezenței blocul de injecție masică BIM_{Ni}. Valoarea presiunii azotului la ieșirea din acest element al instalației și implicit în secțiunea de injectare în camera de amestec este notată conform schemei din figura 6.6. cu $p_{\mathrm{e,Ni}}$.

Oxigenul este injectat în instalație la debitul $Q^{\mathrm{inj}}_{\mathrm{m,Ox}}$, valoare ce este menținută constantă de-a lungul liniei. În ceea ce privește temperatura de înmagazinare a gazului $T_{\mathrm{B,Ox}}$, și temperatura pe care acesta o are în lungul circuitului, temperaturi absolute, nu există diferențe notabile. După secțiunea de alimentare valoarea acestei mărimi fizice poate fi considerată constantă, $T_{0,\mathrm{Ox}}$.

Presiunea, fiind parametrul asupra căruia se intervine pentru asigurarea unui debit masic constant, înregistrează modificări semnificative de-a lungul parcursului său în instalație. Presiunea de stocare a oxigenului în butelie, notată $p_{\mathrm{B,Ox}}$, se încadrează în categoria presiunilor înalte. După reductorul de presiune, această valoare este redusă la o valoare medie, de utilizare, $p_{0,\mathrm{Ox}}+\Delta p_{\mathrm{df,Ox}}$. Măsurarea debitului de oxigen injectat, realizată așa cum s-a specificat anterior prin intermediului ansamblului bloc de control BC_{Ox} – manometru diferențial MD_{Ox}, are ca rezultat o nouă scădere a valorii presiunii de la valoarea medie notată $p_{0,\mathrm{Ox}}+\Delta p_{\mathrm{df,Ox}}$ la valoarea $p_{0,\mathrm{Ox}}$. O a treia modificare se produce în aval ca urmare a prezenței blocul de injecție masică BIM_{Ox}. Valoarea presiunii oxigenului la ieșirea din acest element al instalației și implicit în secțiunea de injectare în camera de amestec este notată conform schemei din figura 6.6. cu $p_{\mathrm{e,Ox}}$.

În ceea ce privește debitele masice ale celor trei gaze $Q^{\mathrm{inj}}_{\mathrm{m,He}}$, $Q^{\mathrm{inj}}_{\mathrm{m,Ni}}$ respectiv, $Q^{\mathrm{inj}}_{\mathrm{m,Ox}}$ acestea se mențin la valori constante în lungul fiecărei linii, în final rezultând debitul total al amestecului TRIMIX $Q^{\mathrm{inj}}_{\mathrm{m,am}}=Q^{\mathrm{inj}}_{\mathrm{m,He}}+Q^{\mathrm{inj}}_{\mathrm{m,Ni}}+Q^{\mathrm{inj}}_{\mathrm{m,Ox}}$.

6.4 DESCRIEREA FUNCȚIONĂRII BLOCULUI DE CONTROL BC ȘI A BLOCULUI DE INJECȚIE MASICĂ BIM

Ambele blocuri și anume cel de control BC și cel de injecție masică BIM, au ca elemente principale ajutaje. Primul dintre acestea, este un microajutaj cilindric conceput astfel încât funcționarea sa să se producă în regim necritic (subsonic), iar cel de al doilea un microajutaj convergent, care lucrează în secțiunea minimă (în col) în regim critic (sonic). (figura 6.7 a și b).

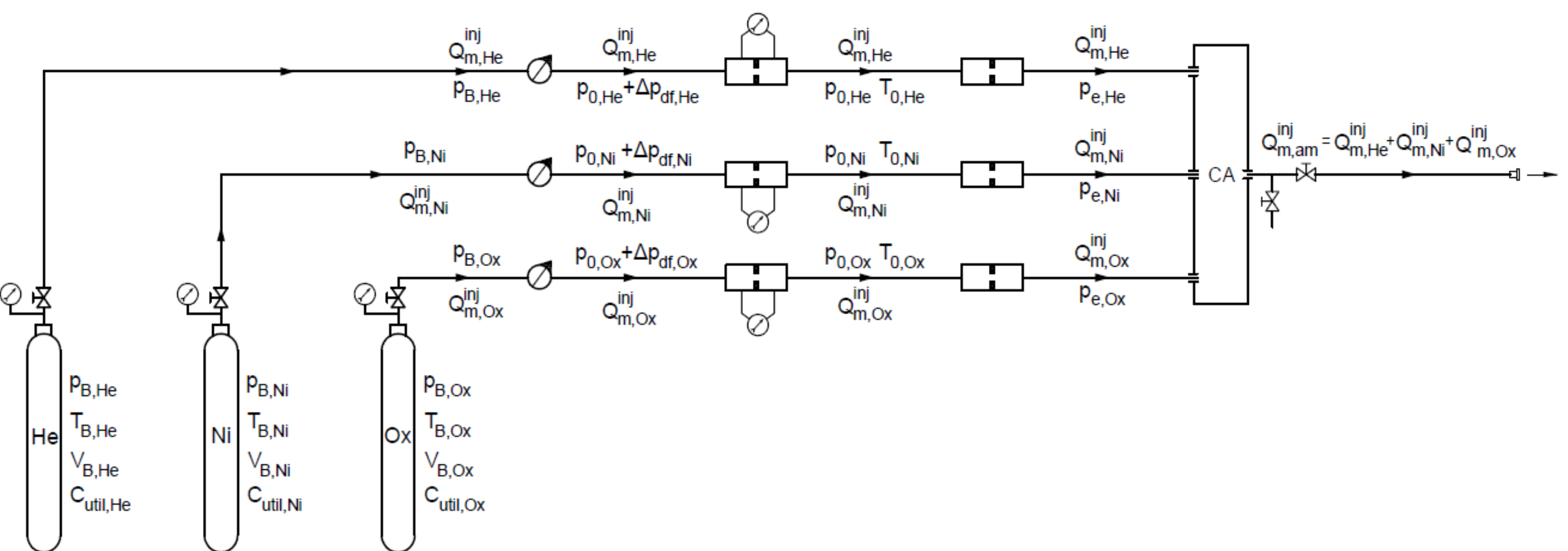
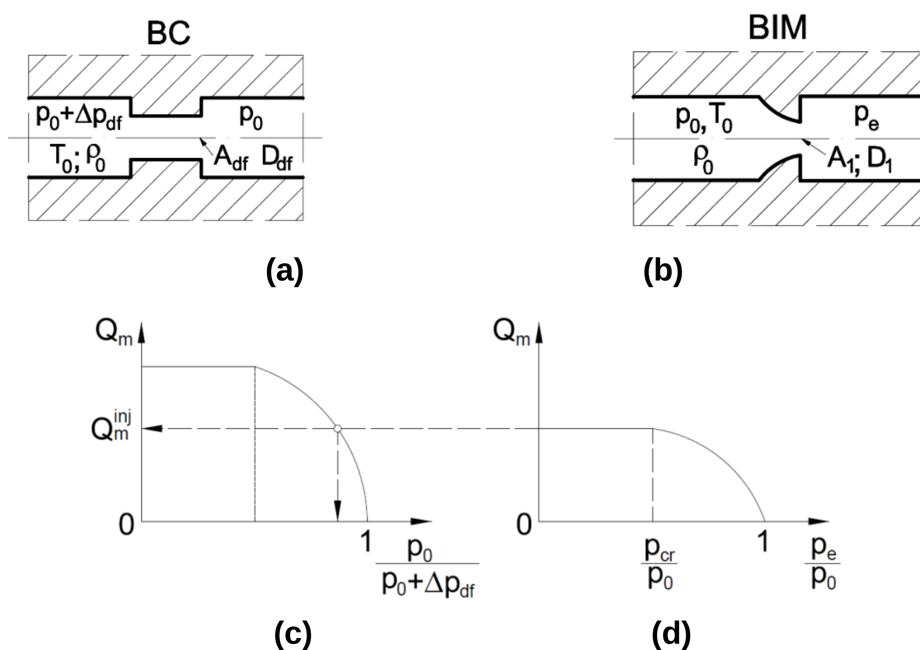


Figura 6.6 Parametri gazelor componente, heliu (He), azot (Ni) respectiv oxigen (Ox) și ai amestecului gazos TRIMIX în lungul instalației de preparare a amestecului ternar



(a) – ajutajul cilindric subsonic (necritic) și mărimile fizice caracteristice aferente;
(b) – ajutajul convergent sonic (critic) și mărimile fizice caracteristice aferente;
(c) – reprezentare grafică a variației debitului masic Q_m corespunzătoare ajutajului cilindric funcționând în regim necritic; (d) reprezentare grafică a variației debitului masic Q_m corespunzătoare ajutajului convergent funcționând în regim critic

Figura 6.7 Ajutajele corespunzătoare BC respectiv BIM și reprezentarea grafică corelată a relației debit masic – presiuni caracteristice

Rolul celor două elemente este diferit. Blocul de control, BC, este destinat măsurării, prin intermediul unui manometru diferențial, a diferenței de presiune Δp dintre presiunea $p_0 + \Delta p$ existentă în amonte de microajutajul cilindric și presiunea p_0 din aval de acesta. Astfel, prin intermediul microajutajului cilindric prevăzut în cadrul blocului de control BC, este asigurată măsurarea și controlul debitului furnizat prin intermediul liniilor de distribuție-injectare a gazelor componente ale amestecului respirator. În domeniul subsonic, căderea de presiune Δp realizată cu ajutorul acestui element este dependentă de debitul masic injectat.

Prin intermediul blocului de injecție masică BIM, datorită prezenței ajutajului convergent, în a cărui secțiune minimă curgerea are loc în regim critic (sonic), se asigură, în regim permanent de mișcare, livrarea unui debit masic constant de heliu, azot sau oxigen spre camera de amestec CA.

Condițiile de funcționare în regim critic a BIM și modul de calcul prin care se stabilește valoarea presiunii minime de alimentare a acestui element pentru ca injectarea gazului să se realizeze la debit masic constant, sunt prezentate în subcapitolul 8.3 intitulat „Relații de calcul utilizate pentru modelarea proceselor gazodinamice aferente instalației experimentale”.

6.5 VARIANTE POSIBILE DE REALIZARE A INSTALAȚIEI PROPUSE

Instalația de concepție originală, prezentată în cadrul prezentei lucrări, având ca scop prepararea amestecurilor respiratorii poate fi realizată în două variante distincte și anume: în varianta destinată aparatelor de scufundare autonome (figura 6.8), sau în varianta pentru asigurarea amestecurilor respiratorii necesare alimentării incintelor presurizate de tipul barocamerelor și în varianta pentru misiuni de scufundare cu alimentarea scafandrului de la suprafață (figura 6.9). Trebuie precizat faptul că, în continuare, s-a luat în discuție cea mai complexă variantă a instalației cu ajutorul căreia se pot prepara atât amestecuri binare cât și amestecuri ternare.

În ambele variante constructive, instalația, în varianta constructivă cea mai complexă, este alcătuită din trei linii distincte de distribuție-injectare a gazelor componente ce formează amestecul. În funcție de tipul amestecului respirator necesar a fi preparat, instalația va avea active pentru formarea amestecurilor binare două linii A și C sau B și C, iar pentru amestecurile ternare toate cele trei linii A, B și C. Linia C este destinată oxigenului, iar liniile A, și B gazelor inerte utilizate la formarea amestecului respirator.

6.5.1 Instalație de preparare în flux continuu a amestecurilor respiratorii destinată scufundării autonome

Referitor la instalația concepută în varianta destinată scufundării autonome, (figura 6.8), linia (A) destinată gazului inert (de exemplu heliu), are ca prim element butelia de stocare (1) prevăzută cu robinetul (2) prin intermediul căruia se realizează admisia gazului în circuit.

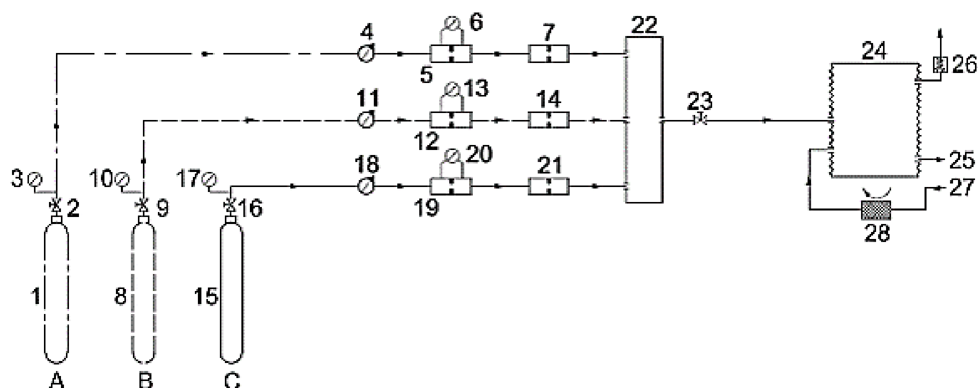


Figura 6.8 Schema instalației de prepararea a amestecurilor respiratorii destinată scufundării autonome

Verificarea valorii presiunii la care este livrat gazul se face cu manometrul de înaltă presiune (3). Pentru reducerea presiunii de la nivelul presiunii înalte existente în bateria de butelii, la nivelul presiunii medii s-a prevăzut un regulator

de presiune nepilotat având ca referință presiunea atmosferică (4). Verificarea corectitudinii funcționării liniei (A) se face cu ajutorul blocului de control (5), care are ca element principal un microajutaj lucrând în domeniul subsonic. Diferența de presiune la trecerea fluidul prin acest element este urmărită prin intermediul manometrului diferențial (6). Pentru livrarea unui debit masic de gaz constant spre camera de amestec (22), linia (A) s-a prevăzut cu un bloc de injecție masică (7) dotat cu un microajutaj convergent lucrând în domeniul critic (sonic).

Liniile (B) și (C) au o structură similară cu linia (A) diferențele constând în tipul gazelor vehiculate și al valorilor mărimilor caracteristice, aspect ce poate necesita aparate și elemente componente ce funcționează în intervale diferite. Linia (B), folosită pentru distribuția și injectarea celui de al doilea gaz inert (de exemplu azot), are în componență butelia pentru stocarea gazului (8), robinetul de admisie (9), manometrul de înaltă presiune (10), regulatorul de presiune nepilotat având ca referință presiunea atmosferică (11), blocul de control (12) la care este asociat manometrul diferențial (13) și blocul de injecție masică (14). În cazul liniei (C), destinată distribuției și injectării oxigenului, admisia gazului din butelia de stocare (15) în circuit se face prin deschiderea robinetului (16). Presiunea la care gazul este livrat este verificată prin intermediul manometrului de înaltă presiune (17) care precedă reductorul de presiune nepilotat (18) ce are ca referință presiunea atmosferică. Ca și în cazul celorlalte două linii funcționarea corectă a liniei (C) este verificată prin intermediului ansamblului bloc de control (19) – manometru diferențial (20). Injectarea oxigenului la debit masic constant este realizată prin intermediul blocului de injecție masică (21).

Formarea propriu-zisă a amestecurilor binare sau a celor ternare are loc în camera de amestec (22). De aici, prin reglarea robinetului (23), amestecul format este livrat către sacul respirator (24) care are rolul de a prelua variațiile de volum și presiune rezultate prin respirație, de a reduce presiunea gazului din interior la nivelul presiunii hidrostatice corespunzătoare adâncimii de scufundare, precum și de a asigura stocarea gazului la parametrii doriți, necesari respirației. Din sacul respirator amestecul este distribuit către consumator în cantitatea și la presiunea necesară prin circuitul (25). Gazul expirat de către scafandru, este un amestec de oxigen, gaz inert și dioxid de carbon; pentru reținerea acestuia din urmă s-a prevăzut, pe circuitul de expirație (27), cartușul epurator (28). Acesta asigură reținerea dioxidului de carbon din amestecul respirator expirat. Deoarece odată cu scăderea adâncimii de scufundare (în momentul revenirii scafandrului la suprafață) apare în sacul respirator un surplus de gaz, s-a prevăzut supapa de evacuare (26) care asigură evacuarea acestui surplus.

6.5.2 Instalație de preparare în flux continuu a amestecurilor respiratorii destinată alimentării incintelor presurizate și scafandrilor cu alimentare de la suprafață

În varianta sa neimersabilă, instalația concepută pentru prepararea amestecurilor respiratorii în mediu uscat, cum ar fi laboratoare hiperbare, pe

punțile navelor sau pe platforme marine, figura 6.9, are în alcătuirea sa trei linii distincte pentru distribuția și injectarea gazelor componente ale amestecului. Liniile (A) și (B) corespund gazelor inerte folosite, iar linia (C) oxigenului. În cazul preparării unui amestec binar vor fi active linia (A) sau linia (B) în asociere cu linia (C), iar pentru fabricarea amestecurilor ternare toate cele trei linii.

Lina (A) este alimentată cu gazul stocat în butelia (1), prin deschiderea robinetului de admisie (2). Presiunea de alimentare este verificată cu un manometru de înaltă presiune (3). Pentru o primă modificare a presiunii de la valoarea de livrare, situată în categoria presiunilor înalte, la presiuni medii s-a prevăzut un regulator de presiune nepilotat (4) având ca referință presiunea atmosferică. În aval de acesta, a fost dispus un manometru de presiune medie (5) prin care este verificată modificarea treptei de presiune. Valoarea debitului de gaz vehiculat prin linia (A) se reglează prin acționarea robinetului de reglaj cu ac (6). Trecerea de la valorile medii ale presiunii la valori joase necesare alimentării blocului de injecție masică (10) și verificarea funcționării corecte a liniei (A) se face prin intermediul blocului de control (7) și a manometrului diferențial asociat (8). Valoarea presiunii gazului la intrarea și la ieșirea din blocul de injecție masică (10) este citită la manometrele (9) și respectiv (11). Verificarea debitului de gaz injectat se face cu rotametrul (12). Pentru a facilita efectuarea unor operații precum înlocuirea acestui aparat de măsură fără a descărca linia (A) s-au prevăzut robinete de separație (13) și (14), iar pentru bypassarea rotametrului circuitul alternativ cu robinetul (15). La capătul aval al liniei (A) există supapa de sens (16) prin prezența căreia se elimină posibilitatea pătrunderii pe linia (A), din direcție inversă curgerii, a altui gaz sau a unui amestec de gaze format în faza de amorsare a instalației.

Linia (B), destinată celui de al doilea gaz inert este alimentată din butelia (17) odată cu deschiderea robinetului (18). Pentru o primă modificare a treptei de presiune s-a prevăzut regulatorul de presiune nepilotat având ca referință presiunea atmosferică (20). Verificarea valorii presiunilor de livrare a gazului și ulterior schimbării treptei de presiune se face cu manometrul de înaltă presiune (19) respectiv cu manometrul de joasă presiune (21). Reglajul debitului de gaz pe linia (B) se face cu robinetul de reglaj cu ac (22). În aval de acesta sunt blocul de control (23) la care este atașat manometrul diferențial (24), urmat de manometrul (25) destinat verificării presiunii pe care gazul o are la ieșirea din blocul de control respectiv la intrarea în blocul de injecție masică (26). Acesta este succedat de manometrul (27) prevăzut pentru a controla valoarea presiunii pe care gazul o are după parcurgerea procesului de injectare propriu-zis.

Debitul de gaz distribuit prin linia (B) este verificat cu rotametrul (28). Separarea rotametrului poate fi făcută cu robinetele (29) și (30), iar pentru bypassarea acestuia s-a prevăzut trasul alternativ cu robinetul de separare (31). Supapa de sens (32) este ultimul element al liniei (B) și are ca scop asigurarea curgerii unidirecționale, de la secțiunea de alimentare spre aval.

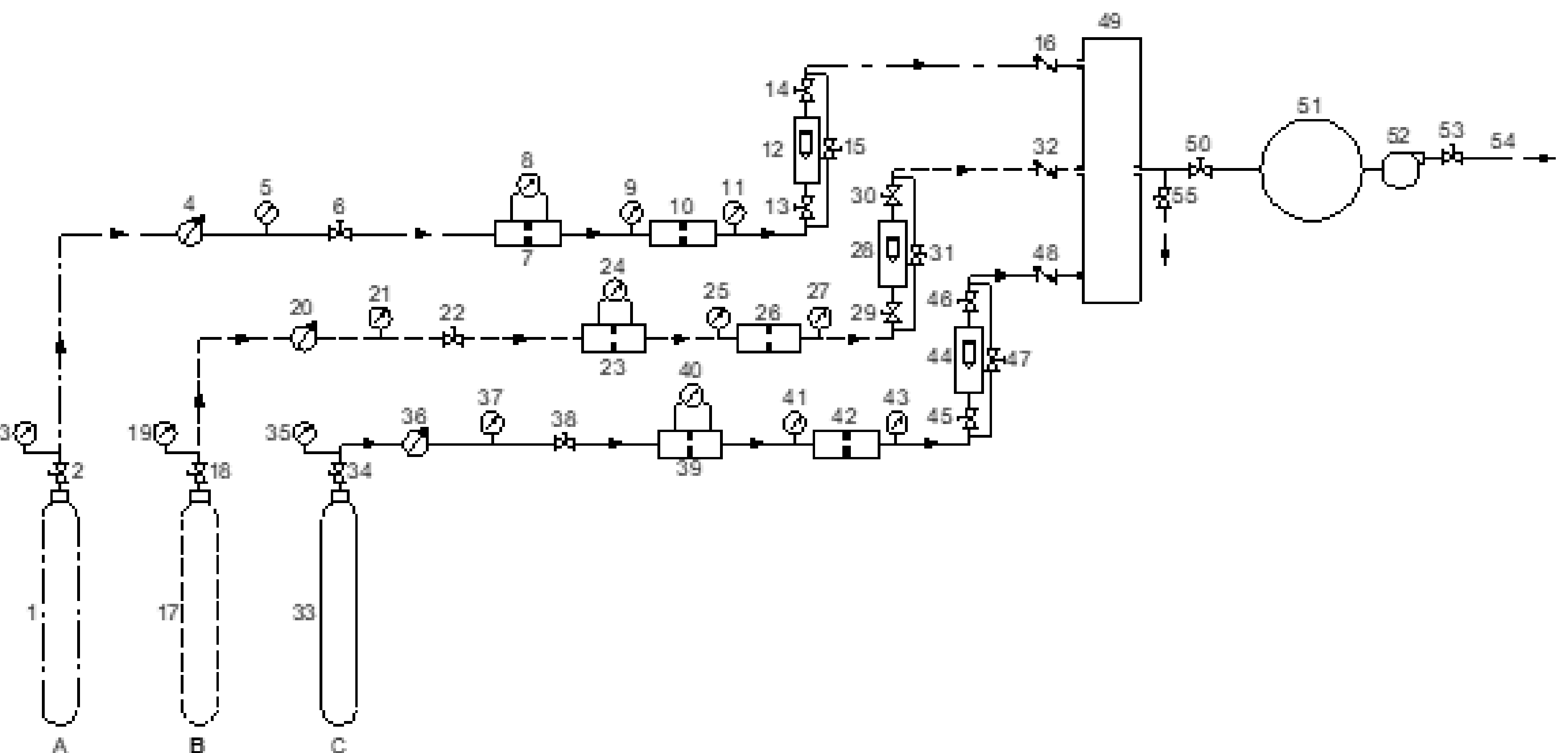


Figura 6.9 Schema instalației neimersabile pentru prepararea amestecurilor respiratorii destinată alimentării incintelor presurizate de tipul barocamerelor și scafandrilor cu alimentare de la suprafață

Prin linia (C) este distribuit oxigenul. Structura acesteia este similară cu cea a liniilor (A) și (B), iar elementele componente au aceeași funcționalitate. În ordinea succedării lor, elementele componente sunt: butelia de stocare (33), robinetul (34), manometrul de înaltă presiune (35) regulatorul de presiune treapta I nepilotat (36), având ca referință presiunea atmosferică, manometrul de medie presiune (37), robinetul de reglaj cu ac (38), blocul de control (39) la care este atașat manometrul diferențial (40), manometrul (41) pentru măsurarea presiunii gazului la ieșirea din blocul de control, blocul de injecție masică (42), manometrul (43) pentru verificarea valorii presiunii gazului după injectare, rotametrul (44) și robinetele de separare (45), și (46) și traseul de bypass cu robinetul (47). Ca ultim element este supapa de sens (48).

Cele trei linii (A), (B) și (C) converg către camera de amestec (49) în care are loc formarea amestecului respirator binar sau ternar, în funcție de numărul de componente folosite și implicit de numărul de linii active. După camera de amestec este prevăzut robinetul de separare (50), incinta de acumulare (51) și surpresorul (52) cu rol de creștere a presiunii amestecului livrat către consumator la valorile corespunzătoare adâncimii de scufundare. Pentru cuplarea/ decuplarea instalației de la diverse instalații de livrare a amestecului respirator, este prevăzut robinetul de separare (53) ce izolează ansamblul instalație-treapta de ridicare a presiunii de circuitul de livrare al amestecului către consumator (54). Pentru golirea instalației s-a prevăzut robinetul (55).

7

INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ DESTINATĂ VALIDĂRII MODELULUI DE CALCUL AFERENT METODEI DE PREPARARE ÎN FLUX CONTINUU A AMESTECURILOR RESPIRATORII BINARE NITROX ȘI HELIOX ȘI TERNARE TRIMIX

Pentru validarea, prin experiment, a modelului de calcul aferent metodei de preparare a amestecurilor respiratorii binare NITROX și HELIOX și ternare TRIMIX și pentru verificarea modului de funcționare a instalației propuse, având principiul de funcționare descris în capitolul anterior, s-a conceput o instalație experimentală bazată pe schemele de principiu prezentate în capitolul anterior.

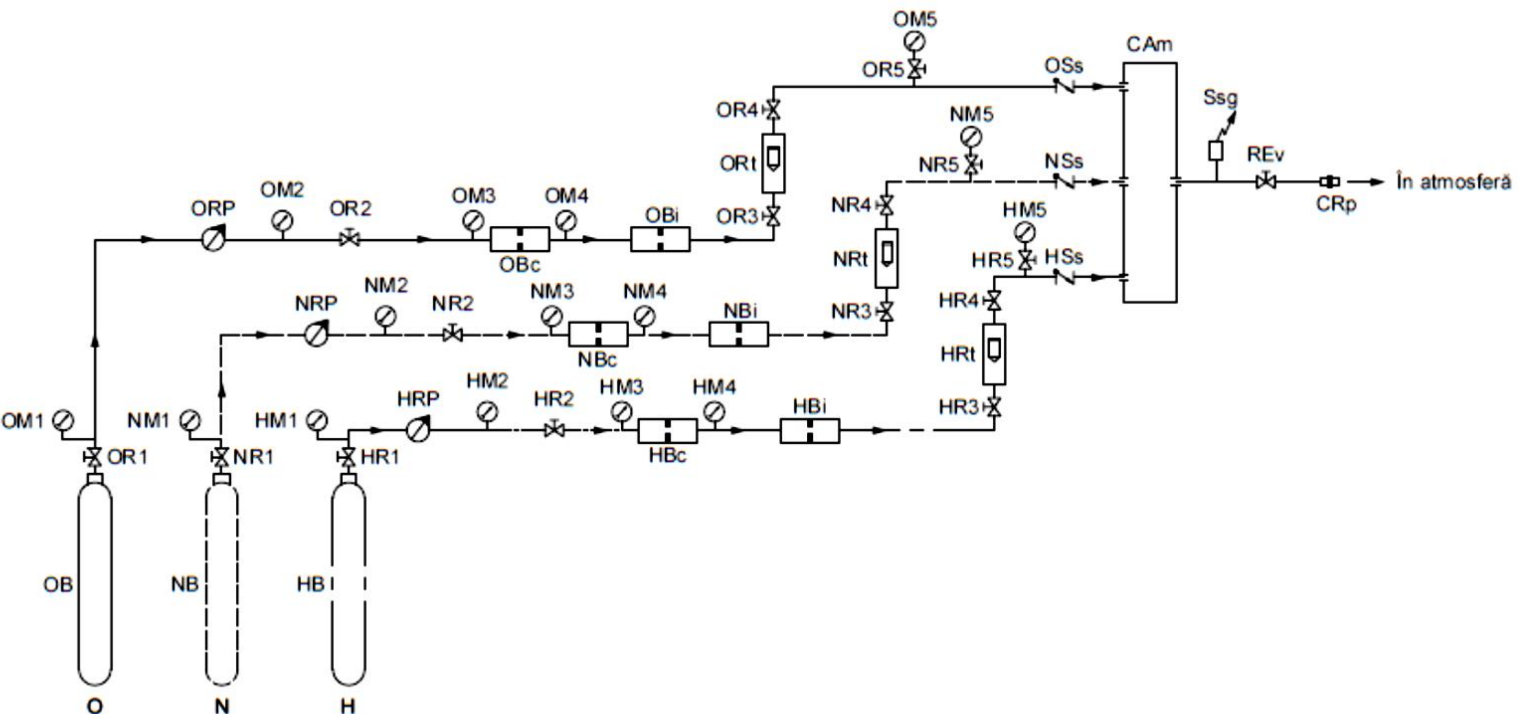
7.1 DESCRIEREA INSTALAȚIEI EXPERIMENTALE FOLOSITĂ PENTRU PREPARAREA AMESTECURILOR RESPIRATORII BINARE NITROX ȘI HELIOX ȘI TERNARE TRIMIX

Schema de principiu a instalației experimentale, concepută de autorii prezentei cărți și realizată și testată în cadrul Laboratorului Hiperbar, este prezentată în figura 7.1.

Realizarea instalației s-a făcut în colaborare cu Centrul 39 Scafandri Constanța al Forțelor Navale Române, testele experimentale fiind derulate în cadrul Laboratorului Hiperbar de pe lângă Centrul de Scafandri.

Instalația experimentală realizată se încadrează în categoria instalațiilor destinate preparării în flux continuu a amestecurilor respiratorii binare și ternare, rezultate din amestecarea în proporția dorită, a gazelor pure azot, heliu și oxigen stocate individual în butelii. Varianta în care s-a realizat instalația experimentală este destinată funcționării în mediu uscat, amestecul preparat putând fi trimis spre un potențial consumator, direct printr-o conductă, sau printr-un sistem ombilical, sau poate fi stocat în butelii până la o utilizare ulterioară.

Instalația experimentală a fost executată conform schemei de principiu din figura 7.1, în figura 7.2 fiind prezentată o fotografie cu instalația experimentală realizată și folosită în cadrul studiilor de laborator ce au urmărit testarea funcționării acesteia și a validării modelelor de calcul ce descriu procesele gazodinamice implicate și care sunt studiate și expuse în cadrul prezentei lucrări.



LEGENDA

O – Linia oxigenului; N – Linia azotului; H – Linia heliului; OB – Butelie oxigen; NB – Butelie azot; HB – Butelie heliu; OR1 ÷ OR5 – Robinete pe linia oxigenului; NR1 ÷ NR5 – Robinete pe linia azotului; HR1 ÷ HR5 – Robinete pe linia heliului; OM1 ÷ OM4 – Manometre pe linia oxigenului; NM1 ÷ NM4 – Manometre pe linia azotului; HM1 ÷ HM4 – Manometre pe linia heliului; ORP – Reductor de presiune nepilotat pe linia oxigenului; NRP – Reductor de presiune nepilotat pe linia azotului; HRP – Reductor de presiune nepilotat pe linia heliului; OBc – Bloc de control pe linia oxigenului; NBc – Bloc de control pe linia azotului; HBc – Bloc de control pe linia heliului; OBi – Bloc de injecție pe linia oxigenului; NBi – Bloc de injecție pe linia azotului; HBi – Bloc de injecție pe linia heliului; ORt – Rotametru pe linia oxigenului; NRt – Rotametru pe linia azotului; HRt – Rotametru pe linia heliului; OSs – Supapă de sens pe linia oxigenului; NSs – Supapă de sens pe linia azotului; HSs – Supapă de sens pe linia heliului; CAm – Camera de amestec; Ssg – Supapă de siguranță; REv – Robinet de evacuare; CRp – Sistem/element cuplare

Figura 7.1 Schema instalației experimentale concepută și proiectată de autorii prezentei lucrări și executată și testată în cadrul Laboratorului Hiperbar de pe lângă Centrul de Scafandri al Forțelor Navale Române

Instalația experimentală este alcătuită din trei linii distincte, fiecare destinată unui singur gaz și anume linia oxigenului notată cu „O”, linia azotului notată cu „N” și linia heliului notată cu „H”.

Alimentarea liniei „O” cu oxigenul stocat în butelia OB, se face prin deschiderea robinetului OR1. Valoarea presiunii de alimentare este citită la manometrul de înaltă presiune, OM1. Pentru modificarea treptei de presiune, de la presiunea înaltă de stocare la treapta de presiune medie, a fost prevăzut un reductor de presiune nepilotat, ORP, având ca referință presiunea atmosferică. Verificarea valorii presiunii existente în instalație după modificarea treptei de presiune este efectuată cu manometrul de presiune medie notat OM2. Pentru reglarea debitului de oxigen, s-a prevăzut robinetul de reglaj OR2. Blocul de control OBc are rolul de a realiza o nouă modificare a treptei de presiune de la valori medii la valorile necesare alimentării blocului de injecție masică, OBi. Diferența de presiune apărută ca urmare a trecerii fluidului prin microajutajul blocului de control se face prin citirea manometrelor OM3 respectiv OM4, acesta din urmă redând valoarea presiunii de alimentare a blocului de injecție OBi. Diferența de presiune dintre manometrele OM3 și OM4 rămâne constantă atâta timp cât debitul masic de oxigen prin linia „O” rămâne constant. Valoarea debitului de oxigen injectat se citește de la rotametrul notat ORt. Robinetele OR3 respectiv OR4 asigură posibilitatea înlocuirii acestui aparat de măsură fără a goli întreaga linie. Controlul valorii presiunii după ORt se face prin intermediul manometrului de joasă presiune OM5. Branșarea acestui manometru la linia oxigenului se face printr-o priză de presiune dotată cu un robinet, notat în schema din figura 6.1 cu OR5. Pentru a elimina posibilitatea alimentării necontrolate a liniei oxigenului de la extremitatea din aval, s-a prevăzut supapa de sens OSs.

Alimentarea liniei „N” cu azotul stocat în butelia NB, se face prin deschiderea robinetului NR1. Valoarea presiunii de alimentare este citită la manometrul de înaltă presiune, NM1. Pentru modificarea treptei de presiune, de la presiunea înaltă de stocare la treapta de presiune medie, a fost prevăzut un reductor de presiune nepilotat, NRP, având ca referință presiunea atmosferică. Verificarea valorii presiunii existente în instalație după modificarea treptei de presiune este efectuată cu manometrul de presiune medie notat NM2. Pentru reglarea debitului de azot, s-a prevăzut robinetul de reglaj NR2. Blocul de control NBc are rolul de a realiza o nouă modificare a treptei de presiune de la valori medii la valorile necesare alimentării blocului de injecție masică, NBi. Diferența de presiune apărută ca urmare a trecerii fluidului prin microajutajul blocului de control se face prin citirea manometrelor NM3 respectiv NM4, acesta din urmă redând valoarea presiunii de alimentare a blocului de injecție NBi. Diferența de presiune dintre manometrele NM3 și NM4 rămâne constantă atâta timp cât debitul masic de azot prin linia „N” rămâne constant. Valoarea debitului de azot injectat se citește de la rotametrul notat NRt. Robinetele NR3 respectiv NR4 asigură posibilitatea înlocuirii acestui aparat de măsură fără a goli întreaga linie. Controlul valorii presiunii după NRt se face prin intermediul manometrului de joasă presiune NM5. Branșarea acestui manometru la linia azotului se face

printr-o priză de presiune dotată cu un robinet, notat în schema din figura 6.1 cu NR5. Pentru a elimina posibilitatea alimentării necontrolate a liniei azotului de la extremitatea din aval, s-a prevăzut supapa de sens NSs.

Alimentarea liniei „H” cu heliul stocat în butelia HB, se face prin deschiderea robinetului HR1. Valoarea presiunii de alimentare este citită la manometrul de înaltă presiune, HM1. Pentru modificarea treptei de presiune, de la presiunea înaltă de stocare la treapta de presiune medie, a fost prevăzut un reductor de presiune nepilotat, HRP, având ca referință presiunea atmosferică. Verificarea valorii presiunii existente în instalație după modificarea treptei de presiune este efectuată cu manometrul de presiune medie notat HM2. Pentru reglarea debitului de heliu, s-a prevăzut robinetul de reglaj HR2. Blocul de control HBc are rolul de a realiza o nouă modificare a treptei de presiune de la valori medii la valorile necesare alimentării blocului de injecție masică, HBi. Diferența de presiune apărută ca urmare a trecerii fluidului prin microajutajul blocului de control se face prin citirea manometrelor HM3 respectiv HM4, acesta din urmă redând valoarea presiunii de alimentare a blocului de injecție HBi.



Figura 7.2 Instalația experimentală – amplasare în incinta Laboratorului Hiperbar de pe lângă Centrul de Scafandri al Forțelor Navale Române

Diferența de presiune dintre manometrele HM3 și HM4 rămâne constantă atâta timp cât debitul masic de heliu prin linia „H” rămâne constant. Valoarea debitului de heliu injectat se citește de la rotametrul notat HRt. Robinetele HR3 respectiv HR4 asigură posibilitatea înlocuirii acestui aparat de măsură fără a goli întreaga linie. Controlul valorii presiunii după HRt se face prin intermediul manometrului de joasă presiune HM5. Branșarea acestui manometru la linia heliului se face printr-o priză de presiune dotată cu un robinet, notat în schema

din figura 7.1 cu HR5. Pentru a elimina posibilitatea alimentării necontrolate a liniei heliului de la extremitatea din aval, s-a prevăzut supapa de sens HSs.

Formarea oricăruia dintre amestecurile binare NITROX/HELIOX sau a celui ternar TRIMIX, se produce în camera de amestec CAm. În avalul camerei de amestec au fost prevăzute o supapă de siguranță Ssg, (cu declanșare la 10,5 bar), cu scopul de a proteja camera de amestec în cazul unor manevre greșite cu risc potențial asupra integrității elementelor instalației, un robinet de evacuare REv și în secțiunea de ieșire din instalație un element de cuplare notat CRp. Trebuie precizat că în cadrul experimentelor aceste ultime două elemente sunt utile pentru prelevarea de probe în vederea analizării amestecului fabricat.

7.2 PREZENTAREA ELEMENTELOR COMPONENTE PRINCIPALE ALE INSTALAȚIEI EXPERIMENTALE

7.2.1 Recipientele pentru stocarea gazelor (buteliile)

Recipientele de stocare (buteliile) sunt incinte metalice rezistente, de formă cilindrică, cu o capacitare de 20 de litri, destinate înmagazinării și transportului gazelor pure și dacă se dorește, și a amestecului respirator binar sau ternar fabricat. Acestea sunt prevăzute cu un gât, cu dimensiuni reduse în comparație cu gabaritul recipientului, la capătul căruia este montat un robinet de închidere (figura 7.3).



Figura 7.3 Recipientele utilizate pentru stocarea gazelor pure folosite în cadrul cercetărilor experimentale

Aceste obiecte conexe instalației propriu-zise au capacitatea de a fi utilizate la testări experimentale pentru prepararea în flux continuu a amestecurilor respiratorii necesare procesului de scufundare la medie și mare adâncime, cu o disponibilitate și bună funcționare pe întreaga perioadă a unui

an indiferent de condițiile mediului exterior. Datele tehnice ale recipientelor de stocare a gazelor sunt date în tabelul 7.1.

Tabelul 7.1 Caracteristicile tehnice ale recipientelor de stocare a gazelor

Caracteristici/ Parametri	**Valori**
Capacitatea de stocare	20 l
Presiunea maximă de stocare	230 bar
Corpul rezervorului	oțel inox
Material conexiune	oțel inox/ racord alamă
Temperatură mediu de lucru	- 20 ÷ + 50^{0}C
Temperatură agent	- 10 ÷ +40^{0}C
Presiune de lucru	0 ÷ 200 bar
Toleranță capacitate stocare	± 2 ÷ 4%

Fiecare recipient, fie că este vorba de cele destinate stocării gazelor pure, fie de cele destinate stocării amestecului, au fost marcate corespunzător pentru identificarea gazului pe care îl conțin.

7.2.2 Reductoarele de presiune

Reductoarele de presiune sunt aparate utilizate pentru reducerea presiunii gazelor de la valorile înalte la care sunt stocate în recipiente, la treapta de presiune medie necesară alimentării celor trei linii din alcătuirea instalației experimentale. Trebuie făcută precizarea că elementul din figura 7.4 reprezintă de fapt, conform schemei din figura 7.1, pentru cele trei linii „O”, „N” și „He” un ansamblu format din robinetul R1 (OR1, NR1 respectiv HR1), manometrul de citirea presiunilor înalte M1 (OM1, NM1 respectiv HM1), reductorul de presiune nepilotat având ca referință presiunea atmosferică RP (ORP, NRP respectiv HRP) și manometrul pentru citirea presiunilor medii M2 (OM2, NM2 respectiv HM2).

Reductoarele de presiune au fost alese în scopul controlului continuu al presiunii gazelor de respirat (oxigen, azot și heliu) folosite în procesul de scufundare la medie și mare adâncime. Ele au capabilitatea de a fi utilizate în cadrul testărilor privind curgerea gazelor folosite la prepararea în mod continuu a amestecurilor respiratorii necesare lucrului sub apă, cu o disponibilitate și bună funcționare de 365 zile/an.

La alegerea reductoarelor de presiune, criteriile generale considerate au fost:

- fiabilitate ridicată;
- ușurința de izolare și conectare la instalația experimentală;
- să nu necesite operațiuni complicate de întreținere și păstrare;
- să poată fi folosit în configurații care să permită procesarea rapidă a parametrilor măsurați;
- carcasă metalică;
- cadran transparent;

- scala de formă semicirculară gradată în bar;
- posibilitate de reglaj fin;
- piese componente realizate din materiale inerte la contactul cu gaze precum oxigen, heliu și azot.

Din punct de vedere al caracteristicilor tehnice, criteriile principale sunt prezentate în tabelul 7.2.

Tabelul 7.2 Caracteristicile tehnice principale ale reductoarelor de presiune alese

Caracteristici/ Parametri	Valori
Domeniul de măsurare la intrare	200/10 bar
Domeniul de măsurare la ieșire	0 ÷ 16 bar
Presiune nominală de lucru	10 bar
Debit	30 mN3/h
Temperatură mediu de lucru	0 ÷ + 500C
Greutate maximă	1 kg
Clasa de precizie	2 ÷ 3

Reductoarele de presiune achiziționate pentru cele trei linii, oxigen, azot și heliu sunt fabricate de compania GCE (figura 7.4) și corespund datelor tehnice din tabelul 7.2.

Manometrele de înaltă presiune M1 (OM1, NM1 și HM1) și cele de presiune medie M2 (OM2, NM2 și HM2) vor fi caracterizate într-un paragraf ulterior ce se referă la acest tip de aparate de măsură.

7.2.3 Robinetele de reglaj și de separație

Robinetele alese pentru reglarea foarte fină a debitului gazelor distribuite prin circuitul de oxigen, de azot și de heliu (OR2, NR2, respectiv HR2) fac parte din categoria robinetelor cu ac (figura 7.5).



Figura 7.4 Reductor de presiune





Figura 7.5 Robinet de reglaj

Caracteristicile tehnice ale acestui tip de organe de reglaj, alese pentru controlarea debitelor de gaz pe cele trei circuite ale instalației experimentale, sunt prezentate în tabelul 7.3.

Pe lângă caracteristicile tehnice prezentate, s-a mai urmărit ca robinetele de reglaj să asigure:

- operabilitate pe întreaga perioadă a unui an;
- asigurarea constanței în funcționare (debitul de gaz și celelalte mărimi determinante o dată stabilite să rămână constante până la executarea unei noi manevre);
- ușurința de izolare și conectare la instalația experimentală;
- operațiuni minime de întreținere și păstrare;
- piese componente realizate din materiale inerte la contactul cu gaze precum oxigen, azot și heliu.

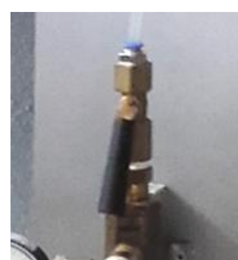
Tabelul 7.3 Caracteristici tehnice principale ale robinetelor de reglaj

Caracteristici/ Parametri	Valori
Material carcasă	alamă
Mod de cuplare	filete de tip: M 3/8 Br
Domeniul maxim de folosință	16 bar
Regimul presiunilor de lucru	0,5 ÷ 12 bar
Temperatură mediu de lucru	-20 ÷ + 50oC
Greutate	≤ 0,3 kg
Clasa de precizie	2 ÷ 3

Robinetele sferice din alcătuirea standului experimental sunt destinate izolării unor trasee sau elemente componente ale instalației. În această categorie se încadrează, conform schemei din figura 7.1, elementele: OR3, NR3, HR3, OR4, NR4, HR4, OR5, NR5, HR5 și REv. În cazul acestor robinete, problema asigurării posibilității reglajului fin al debitelor tranzitate prin instalația experimentală nu a constituit un criteriu de alegere, condiția privind gradul de închidere fiind doar legată de etanșeitate în poziția închis pentru toate cele trei gaze (figura 7.6).



(a)



(b)

(a) – robinet utilizat pe linia oxigenului; (b) – tip de robinet utilizat pe liniile azotului și heliului

Figura 7.6 Robinete de separație

Alte caracteristici legate de selectarea acestor elemente componente ale instalației experimentale sunt date în tabelul 7.4.

Tabelul 7.4 Caracteristici tehnice principale ale robinetelor sferice

Caracteristici/ Parametri	Valori
Material carcasă	alamă
Mod de cuplare	filete de tip: M 3/8 Br
Domeniul maxim de folosință	16 bar
Regimul presiunilor de lucru	0,5 ÷ 12 bar
Temperatură mediu de lucru	-20 ÷ + 50oC
Greutate	≤ 0,3 kg
Clasa de precizie	2 ÷ 3

Suplimentar, s-au mai avut în vedere și aspectele următoare:

- operabilitate 365 zile/an;
- ne perturbarea constanței în funcționare a instalației;
- ușurința de izolare și conectare la instalația experimentală;
- operațiuni minime de întreținere și păstrare;
- piese componente realizate din materiale inerte la contactul cu gaze precum oxigen, heliu și azot.

7.2.4 Manometrele pentru presiuni înalte, medii și joase

Manometrele prevăzute în dotarea standului experimental se încadrează, din punct de vedere al presiunii de lucru, în trei categorii și anume: pentru presiune înaltă (OM1, NM1 și HM1), pentru presiune medie (OM2, NM2, HM2, OM3, NM3, HM3 și OM4, NM4, HM4) și pentru presiune joasă (OM5, NM5, HM5).

Așa cum s-a precizat în paragraful 7.2.2, manometrele OM1, NM1, HM1 și OM2, NM2, HM2 fac parte, împreună cu reductoarele de presiune corespunzătoare dintr-un ansamblu (figura 7.4).

Manometrele din dotarea standului experimental asigură măsurarea continuă a valorii presiunii gazelor implicate în procesul de fabricare al amestecului respirator. Aceste aparate, indiferent de treapta de presiune la care operează, au fost alese din categoria manometrelor cu element elastic. În cazul manometrelor prevăzute pe linia oxigenului o condiție obligatorie s-a referit la absența produselor de lubrifiere (uleiuri) de pe suprafețele pieselor componente din interiorul aparatului (figura 7.7 - a).

Pentru tronsoanele de instalație care lucrează la presiuni medii și joase, au fost alese aparate cu aceleași caracteristici constructive, modelul ales respectând toate cerințele necesare atât din punct de vedere al presiunilor de lucru cât și din punct de vedere al interacțiunii chimice gaz – aparat de măsură. În figura 7.8 este prezentat unul dintre manometrele prevăzute în punctele de măsură ale celor trei linii în care valoarea presiunii gazelor se încadrează în treapta de presiune medie sau în cea de presiune joasă.



(a)



(b)

Figura 7.7 Manometre de înaltă și medie presiune (a) - OM1 respectiv OM2; (b) - NM1 respectiv NM2 (similar cu HM1 respectiv HM2)

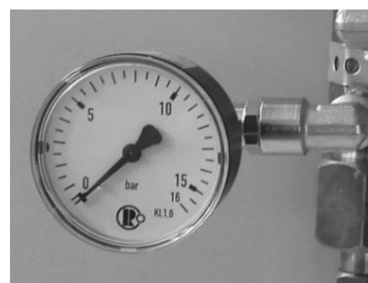


Figura 7.8 Manometru folosit pentru măsurarea presiunilor medii și joase

Pentru tronsoanele de instalație care lucrează la presiuni medii și joase, au fost alese aparate cu aceleași caracteristici constructive, modelul ales respectând toate cerințele necesare atât din punct de vedere al presiunilor de lucru cât și din punct de vedere al interacțiunii chimice gaz – aparat de măsură.

Datele tehnice pe care manometrele dispuse în secțiunile de măsură ale standului au trebuit să le respecte sunt date în tabelul 7.5 și tabelul 7.6.

Tabelul 7.5 Caracteristici tehnice principale ale reductorului de presiune și ale manometrelor asociate

Caracteristici/ Parametri	Valori
Domeniul de măsurare la intrare	200/10 bar
Domeniul de măsurare la ieșire	0 ÷ 16 bar
Presiune nominală de lucru	10 bar
Debit	30 mN3/h
Temperatură mediu de lucru	0 ÷ + 500C
Greutate maximă	1 kg
Precizie	2 ÷ 3

Tabelul 7.6 Caracteristici tehnice principale ale manometrelor pentru măsurarea presiunilor medii și joase

Caracteristici/ Parametri	Valori
Material carcasă	metalică
Mod de cuplare	racord axial
Forma cadranului	rotundă 40 ÷ 60 mm
Afișaj	analogic
Scala	circulară, gradată în bar
Domeniul de măsurare	0 ÷ 16 bar
Temperatură mediu de lucru	0 ÷ + 50oC
Greutatea aparat	≤ 0,3 kg
Clasa de precizie	2 ÷ 3

De asemenea, manometrele din dotarea instalației experimentale mai îndeplinesc și următoarele cerințe:

- operabilitate 365 zile/an;

- ne perturbarea constanței în funcționarea instalației;
- ușurința de conectare și izolare la instalația experimentală;
- operațiuni minime de întreținere și păstrare;
- piese componente realizate din materiale inerte la contactul cu gaze precum oxigen, heliu și azot.

7.2.5 Blocurile de control. Blocurile de injecție masică

Blocurile de control (Bc) și blocurile de injecție masică (Bi) constituie elemente principale ale celor trei linii. Constructiv, aceste două componente ale instalației experimentale au fost realizate sub forma unui ansamblu compact ce asigură funcțiile pe care cele două blocuri le au individual. Asociat ansamblurilor Bc – Bi sunt dispuse manometrele M3 (OM3, NM3, HM3) și M4 (OM4, NM4, HM4) și de asemenea, sunt conectate rigid, amonte și aval, robinetele de reglaj R2 (OR2, NR2, HR2) și robinetele de separație R3 (OR3, NR3, HR3), ansamblu astfel format având un aspect compact (figura 6.9).

Blocul de control Bc și blocul de injecție masică Bi sunt fabricate din alamă folosind tehnologiile clasice de prelucrare prin așchiere. Proiectarea alcătuirii constructive a ansamblurilor Bc – Bi ale celor trei linii de injecție a fost făcută de către specialiștii Laboratorului de Cercetare Pătrundere Sub Apă (C.P.S.A.) și au fost realizate în cadrul atelierului mecanic ce deservește Laboratorul Hiperbar, toate fiind departamente ale Centrului de Scafandri Constanța din cadrul Forțelor Navale Române.

În alcătuirea ansamblului Bc - Bi intră corpul ansamblului și o serie de repere precum: îmbinări demontabile (racord olandez), ștuțuri de cuplare, ștuțuri de măsurare, garnituri de etanșare și șuruburi de fixare de concepție specială.

7.2.6 Microajutajele de control și injecție

Microajutajele sunt deschideri cu forme speciale, executate în elemente metalice de un aspect și de un gabarit precis și care constituie piese componente ale ansamblului Bc – Bi (figura 7.9). Fiecare din cele trei blocuri au montate în interior câte o piesă în care este practicat câte un microajutaj de control (diafragmă de măsură) urmată de către o alta în care există un microajutaj de injecție (ajutaj de injecție), acesta din urmă controlând practic dozajul gazelor injectate în camera de amestec, fiind astfel elementul esențial al instalației. Descrierea funcționării și diferențele dintre aceste două tipuri de microajutaje este prezentată în subcapitolul 6.4 „Descrierea funcționării blocului de control BC și a blocului injecție masică BIM”.

Microajutajele folosite în instalația experimentală au fost realizate prin electroeroziune în cadrul unui atelier specializat, urmat de o alezare cu alezoare speciale de foarte mici dimensiuni. Aceste piese au fost executate din alamă. În urma prelucrărilor mecanice, au rezultat „pastile” cu diametrul de 10 mm și 1 mm grosime în care au fost realizate prin procedeul electrochimic menționat anterior și apoi prin alezare, ajutajele propriu-zise (figura 7.10).



(a)



(b)



(c)

(a) – ansamblul Bc – Bi corespunzător liniei oxigenului; (b) – ansamblul Bc – Bi corespunzător liniei azotului; (c) – ansamblul Bc – Bi corespunzător liniei heliului

Figura 7.9 Ansamblul bloc de control (Bc) – bloc de injecție masică (Bi) și elementele asociate pentru cele trei linii de injecție



Figura 7.10 Element „pastilă" în care s-a executat microajutajul

Valorile diametrelor celor șase microajutaje folosite în cadrul studiilor experimentale efectuate, au fost verificate atât pe baza măsurătorilor directe realizate cu un microscop electronic, cât și prin calcul. Verificările efectuate prin calcul au avut ca date de bază valorile mărimilor termohidraulice caracteristice, valori măsurate în timpul funcționarii instalației experimentale. Aparatul matematic folosit în acest scop este prezentat în capitolul 8 al prezentei lucrări.

7.2.7 Rotametrele pentru controlul debitelor

Rotametrele sunt debitmetre destinate controlului continuu a debitelor de fluid vehiculat prin instalații funcționând sub presiune. Deoarece prin cele trei linii ale instalației se vehiculează, în studiul experimental, oxigen, azot și heliu, aceste aparate au fost alese din gama destinată măsurării debitelor de gaz. Pe lângă natura fluidului măsurat s-au mai avut în vedere natura acestuia, cu restricțiile ce decurg de aici și datele tehnice prezentate în tabelul 7.7.

Tabelul 7.7 Caracteristicile tehnice ale rotametrelor

Caracteristici/ Parametri	**Valori**
Domeniul de măsurare	250 ÷ 11400 cm3/min
Presiune de lucru	5 ÷ 10 bar
Scala	lungime ~ 65mm
Corpul aparatului	sticlă
Material conexiune	aluminiu
Temperatură mediu de lucru	- 20 ÷ + 50oC
Temperatură agent	- 20 ÷ +70oC
Material flotor	oțel inox
Greutatea aparat	≤ 0,8 kg
Toleranța	± 5 % raportat la scală

Rotametrele care au corespuns acestor cerințe sunt de tipul Flow Meter GR-150GK fabricate de firma germană GHM Messtechnik (figura 7.13).

Aceste aparate pot fi utilizate pentru măsurarea mai multor gaze în diverse condiții de operare, pentru acesta însă fiind necesară respectarea procedeelor de conversie specificate de fabricantul rotametrului. Relațiile de conversie sunt expuse în cele ce urmează.

Calculul factorului de corecție F_{gaz}

Valorile scalei se referă la litrii standard de aer în condiții normale de presiune 1,013 bar scară absolută și temperatura de 0°C.

Odată cu schimbarea condițiilor de funcționare, valorile citite trebuie convertite, pentru această operație folosindu-se formulele și tabelele prezentate în continuare.

Factorul de corecție: $F_{gaz} = F_T \cdot F_p \cdot F_\rho$

Influența temperaturii: factorul de corecție F_T

$$F_T = \sqrt{\frac{\text{temperatura de calibrare [K]}}{\text{temperatura de functionare [K]}}} = \sqrt{\frac{0^oC+273}{\text{temperatura de functionare }[0^oC]+273}} \qquad (7.1)$$

Influența presiunii de lucru: factorul de corecție F_p ***Fp***

$$F_p = \sqrt{\frac{\text{presiunea de calibrare [bar abs.]}}{\text{presiunea de functionare [bar abs.]}}} \qquad (7.2)$$

Influența densității gazului: factorul de corecție F_ρ

$$F_\rho = \sqrt{\frac{\text{densitatea aerului la }0^oC}{\text{densitatea gazului la }0^oC}} \qquad (7.3)$$

Tabelul 7.8 Valori ale factorilor de corecție F_ρ în cazul mai multor gaze

Gaz	Formula chimică	Densitatea kg/m³ la 0 °C	Valoarea factorului de corecție Fρ
Amoniac	NH_3	0,64	1,42
Argon	Ar	1,78	0,85
Butan	C_4H_{10}	2,71	0,69
Clor	Cl_2	3,13	0,64
Etan	C_2H_6	1,36	0,97
Etilenă	C_2H_4	1,26	1,01
Heliu	He	0,18	2,68
Monoxid de carbon	CO	1,25	1,02
Dioxid de carbon	CO_2	1,98	0,81
Aer	-	1,29	1,00
Metan	CH_4	0,72	1,34
Oxigen	O_2	1,42	0,95
Azot	N_2	1,25	1,02
Propan	C_3H_8	2,01	0,80
Hidrogen	H_2	0,09	3,79
Xenon	Xe	5,90	0,47

7.2.8 Camera de amestec

Ca și blocurile de injecție masică (Bi), o altă componentă a instalației experimentale care joacă un rol decisiv în prepararea amestecurilor respiratorii fabricate, este camera de amestec (figura 7.14).



Figura 7.13 Rotametru Flow Meter GR-150GK - GHM Messtechnik ales pentru măsurarea debitelor de gaz pe cele trei linii



Figura 7.14 Camera de amestec (CAm)

Principiul care stă la baza realizării unui amestec omogen preparat din cele două gaze (amestec NITROX sau HELIOX) sau trei gaze (amestec TRIMIX) injectate, constă în parcurgerea de către acestea a unui traseu

prevăzut cu șicane, pe parcursul căruia are loc o omogenizare generată de fenomene fizico – chimice.

Trasul de evacuare din camera de amestec are în componență robinetul de evacuare (REv), un element de cuplaj portfurtun (CRp) și supapa de siguranță cu deschidere la presiuni mai mari de 10,5 bar, această valoare reprezentând și presiunea limită de funcționare a acestei incinte presurizate la care a fost avizată de către Inspecția de Stat pentru Controlul Cazanelor, Recipientelor sub Presiune și Instalațiilor de Ridicat (I.S.C.I.R).

Ca și în cazul ansamblului Bc – Bi, proiectarea și realizarea acestei componente a instalației experimentale a fost făcută în cadrul Centrului de Scafandri Constanța, instituție a Forțelor Navale Române.

8

STUDII EXPERIMENTALE PRIVIND REALIZAREA ÎN FLUX CONTINUU A AMESTECURILOR RESPIRATORII BINARE NITROX, HELIOX ȘI TERNARE TRIMIX UTILIZÂND INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ REALIZATĂ

Studiile experimentale derulate au urmărit testarea funcționării instalației experimentale de preparare în flux continuu a amestecurilor respiratorii binare, NITROX și HELIOX și ternare, TRIMIX și, totodată, au avut ca scop și validarea modelului de calcul, folosit pentru evaluarea proceselor gazodinamice ce au loc într-o astfel de instalație.

Testele experimentale s-au derulat în incinta Laboratorului Hiperbar al Centrului de Scafandrii 39 Constanța, unitate NATO a Forțelor Navale Române, care a fost colaborator al Universității Tehnice de Construcții București pe durata efectuării cercetărilor și în final beneficiar al rezultatelor obținute.

8.1 PROCEDURI URMATE ÎN CADRUL TESTELOR EXPERIMENTALE

Testele experimentale s-au derulat etapizat, pentru prepararea fiecărui amestec în parte, fiind urmate proceduri de manevrare a instalației experimentale dinainte stabilite. Pentru identificarea aparatelor de măsură și a mărimilor citite de la acestea, este indicat a se urmări schemele din figura 7.1 și figura 8.3.

Pentru prepararea în flux continuu a amestecului binar NITROX, procedura urmată a fost:

- s-a deschis robinetul OR1 urmat de robinetul NR1, realizându-se astfel comunicarea dintre butelii și circuitele de oxigen și respectiv azot;
- presiunile de stocare a gazelor din butelia corespunzătoare oxigenului și din butelia corespunzătoare azotului au fost verificate prin citirea manometrelor OM1, respectiv NM1;
- presiunile de alimentare a celor două circuite s-au verificat prin citirea manometrelor OM2 pentru linia oxigenului și NM2 pentru linia azotului;
- prin citirea manometrelor OM3 pentru oxigen și NM3 pentru azot s-a realizat, implicit, reglarea debitelor de gaze, corelat cu valoarea presiunilor stabilite în cadrul procedurii experimentale propuse

anterior măsurătorilor, mai precis valoarea presiunii notată $p_{\mathrm{df,Ox}}$ în cazul oxigenului și $p_{\mathrm{df,Ni}}$ în cazul azotului; aceste presiuni sunt cele la care sunt alimentate blocurile de control OBc amplasat pe linia oxigenului, respectiv NBc amplasat pe linia azotului;

- pentru determinarea valorii presiunii de alimentare a blocurilor de injecție masică OBi pentru oxigen și NBi pentru azot s-au citit manometrele OM4 și respectiv NM4;
- s-a verificat debitul de gaz injectat în camera de amestec CAm prin citirea valorilor indicate de rotametrele ORt pentru oxigen și NRt pentru azot;
- a urmat prelevarea probei de amestec respirator preparat (figura 8.1 - a; b);
- s-a efectuat analizarea, cu analizorul de oxigen specializat, a probei de amestec respirator NITROX prelevat în vederea determinării concentrației de oxigen (% Ox) (figura 8.2);
- s-a determinat, prin calcul, concentrația de azot (% Ni) din amestecul NITROX preparat.

Pentru prepararea în flux continuu a amestecului binar HELIOX, procedura urmată a fost:

- s-a deschis robinetul OR1 urmat de robinetul HR1, realizându-se astfel comunicarea dintre butelii și circuitele de oxigen și respectiv heliu;
- presiunile de stocare a gazelor din butelia corespunzătoare oxigenului și din butelia corespunzătoare heliului au fost verificate prin citirea manometrelor OM1, respectiv HM1;
- presiunile de alimentare a celor două circuite s-au verificat prin citirea manometrelor OM2 pentru linia oxigenului și HM2 pentru linia heliului;
- prin citirea manometrelor OM3 pentru oxigen și HM3 pentru heliu s-a realizat, implicit, reglarea debitelor de gaze, corelat cu valoarea presiunilor stabilite în cadrul procedurii experimentale propuse anterior măsurătorilor, mai precis valoarea presiunii notată $p_{\mathrm{df,Ox}}$ în cazul oxigenului și $p_{\mathrm{df,He}}$ în cazul heliului; aceste presiuni sunt cele la care sunt alimentate blocurile de control OBc amplasat pe linia oxigenului, respectiv HBc amplasat pe linia heliului;
- pentru determinarea valorii presiunii de alimentare a blocurilor de injecție masică OBi pentru oxigen și HBi pentru heliu s-au citit manometrele OM4 și respectiv HM4;
- s-a verificat debitul de gaz injectat în camera de amestec CAm prin citirea valorilor indicate de rotametrele ORt pentru oxigen și HRt pentru heliu;

- a urmat prelevarea probei de amestec respirator preparat (figura 8.1 - a; b);
- s-a efectuat analizarea, cu analizorul de oxigen specializat, a probei de amestec respirator HELIOX prelevat în vederea determinării concentrației de oxigen (% Ox) (figura 8.2);
- s-a determinat, prin calcul, concentrația de heliu (% He) din amestecul HELIOX preparat.

Trebuie precizat faptul că procedurile adoptate pentru derularea experimentelor ce au urmărit prepararea amestecurilor binare NITROX și HELIOX, au urmat o succesiune de teste în care presiunea oxigenului la alimentarea ajutajului de injecție masică ($p_{0,\ \mathrm{Ox}}$) s-a păstrat constantă, la o valoare impusă, variindu-se valoarea presiunii gazelor inerte, azot, respectiv heliu, de alimentare a ajutajelor de injecție masică ($p_{0,\ \mathrm{Ni}}$, $p_{0,\ \mathrm{He}}$).

Pentru prepararea amestecului ternar TRIMIX, procedura urmată a fost:

- s-a deschis robinetul OR1 urmat de robinetele NR1 și HR1, realizându-se astfel comunicarea dintre butelii și circuitele de oxigen, azot și respectiv de heliu;
- presiunile de stocare a gazelor din butelia corespunzătoare oxigenului, azotului și din butelia corespunzătoare heliului au fost verificate prin citirea manometrelor OM1, NM1 respectiv HM1;
- presiunile de alimentare a celor trei circuite s-au verificat prin citirea manometrelor OM2 pentru linia oxigenului, NM2 pentru linia azotului și HM2 pentru linia heliului;
- prin citirea manometrelor OM3 pentru oxigen, NM3 pentru azot și HM3 pentru heliu s-a realizat, implicit, reglarea debitelor de gaze, corelat cu valoarea presiunilor stabilite în cadrul procedurii experimentale propuse anterior măsurătorilor, mai precis valoarea presiunii notată $p_{\mathrm{df,Ox}}$ în cazul oxigenului, $p_{\mathrm{df,Ni}}$ în cazul azotului și $p_{\mathrm{df,He}}$ în cazul heliului; aceste presiuni sunt cele la care sunt alimentate blocurile de control OBc amplasat pe linia oxigenului, NBc amplasat pe linia oxigenului, respectiv HBc amplasat pe linia heliului;
- pentru determinarea valorii presiunii de alimentare a blocurilor de injecție masică OBi pentru oxigen, NBi pentru azot și HBi pentru heliu s-au citit manometrele OM4, NM4 și respectiv HM4;
- s-a verificat debitul de gaz injectat în camera de amestec CAm prin citirea valorilor indicate de rotametrele ORt pentru oxigen, NRt pentru azot și HRt pentru heliu;
- a urmat prelevarea probei de amestec respirator preparat (figura 8.1 - a; b);

- s-a efectuat analizarea, cu analizorul de oxigen specializat, a probei de amestec respirator TRIMIX prelevat în vederea determinării concentrației de oxigen (% Ox) (figura 8.2);
- s-a determinat prin calcul, inițial, concentrația cumulată a gazelor inerte, azot și heliu, iar apoi, concentrația de azot (% Ni) respectiv concentrația de heliu (% He) din amestecul TRIMIX preparat.

În cazul procedurii adoptate pentru derularea experimentelor privind prepararea amestecurilor ternare TRIMIX, s-a efectuat o succesiune de teste în care presiunea azotului și heliului la alimentarea ajutajelor de injecție masică ($p_{0,\ \mathrm{Ni}}$, $p_{0,\ \mathrm{He}}$) s-au păstrat constante la o valoare impusă, variindu-se valoarea presiunii oxigenului ($p_{0,\ \mathrm{Ox}}$).



(a)



(b)

(a) – conectarea balonului de prelevare la camera de amestec CAm; (b) – faza finală de prelevare a probei

Figura 8.1 Prelevarea probei de amestec respirator preparat





Figura 8.2 Analizarea amestecului respirator preparat

Deoarece, în cadrul testelor experimentale efectuate, la camera de amestec CAm nu au fost conectați consumatori, elementul de cuplare CRp fiind lăsat liber în atmosferă, în cazul tuturor celor trei tipuri de amestecuri preparate, presiunea $p_{e,Ox}$, $p_{e,Ni}$ și $p_{e,He}$ indicată la manometrele OM5, NM5 și respectiv HM5 a fost egală cu valoarea presiunii atmosferice, adică zero în scară manometrică.

Au fost efectuate 20 de teste experimentale dintre care:

- 8 teste experimentale (1 NiOx – 8 NiOx) privind prepararea în flux continuu de amestecuri binare NITROX, utilizând liniile de oxigen și azot ale instalației experimentale;
- 7 teste experimentale (1 HeOx – 7 HeOx) privind prepararea în flux continuu de amestecuri binare HELIOX, utilizând liniile de oxigen și heliu ale instalației experimentale;
- 5 teste experimentale (1 TRi – 5 TRi) privind prepararea în flux continuu de amestecuri ternare TRIMIX, utilizând toate cele trei linii de oxigen, azot și heliu ale instalației experimentale.

8.2 DATELE OBȚINUTE ÎN URMA TESTELOR EXPERIMENTALE

În urma testelor efectuate pe instalația experimentală, ce au urmărit prepararea în flux continuu a amestecurilor binare NITROX și HELIOX și a celui ternar, TRIMIX, s-au obținut datele experimentale prezentate, în continuare, în tabelele 8.1, 8.2 și 8.3.

8.3 RELAȚII DE CALCUL UTILIZATE PENTRU MODELAREA PROCESELOR GAZODINAMICE AFERENTE INSTALAȚIEI EXPERIMENTALE

Pornind de la conceperea și proiectarea instalației experimentale, privită strict din perspectiva fluxului tehnologic de preparare al amestecurilor respiratorii, elementele ce îl compun pot fi încadrate în două categorii și anume: elemente calculate și elemente selectate pe baza valorilor estimate ale mărimilor fizice implicate în procesul de preparare al amestecului respirator. Din prima categorie fac parte cele două tipuri de microajutaje și anume diafragma de măsură corespunzătoare blocului de control Bc și microajutajul de injecție masică corespunzător blocului de injecție masică Bi, a căror dimensiuni au fost stabilite pe baza valorilor mărimilor fizice determinate în procesul de preparare a amestecului. Din cea de a doua categorie fac parte echipamentele și aparatele ce au fost selectate în funcție de presiunile de lucru, de valorile debitelor vehiculate prin cele trei linii, de temperatura de lucru și, nu în ultimul rând, natura gazelor vehiculate prin fiecare din cele trei linii. Pentru descrierea modului în care s-a efectuat calculul orificiilor celor două microajutaje și pentru descrierea matematică a proceselor gazodinamice implicate, se va avea în vedere schema din figura 8.3, alături de schema din figura 7.1.

Tabelul 8.1 Mărimi fizice caracteristice impuse respectiv obținute în cadrul testelor de preparare a amestecului respirator NITROX

Cod test	NITROX (NiOx)									
	OM 3	OM 4	OM 5	ORt	NM 3	NM 4	NM 5	NRt	Analiză gaze	
	$p_{df, Ox}$	$p_{0, Ox}$	$p_{e, Ox}$	Citire rotametre	$p_{df, Ni}$	$p_{0, Ni}$	$p_{e, Ni}$	Citire rotametre	Ox	Ni
	[bar m]	[bar m]	[bar m]	[mm]	[bar m]	[bar m]	[bar m]	[mm]	[%]	[%]
1 NiOx	5*	4,8	0	33	9*	8,6	0	62	33,92	66,08
2 NiOx	5*	4,8	0	33	8*	7,6	0	54	36,10	63,90
3 NiOx	5*	4,5	0	30	7*	6,0	0	44	39,03	60,97
4 NiOx	5*	4,6	0	34	7*	6,5	0	47	39,75	60,25
5 NiOx	5*	4,8	0	33	6*	5,2	0	38	43,57	56,43
6 NiOx	5*	4,8	0	33	5*	4,6	0	35	45,95	54,05
7 NiOx	5*	4,6	0	33	4*	3,7	0	29	50,07	49,93
8 NiOx	5*	4,8	0	33	3*	2,9	0	24	55,22	44,78

***** - valori impuse, stabilite în cadrul elaborării procedurii de efectuare a testelor experimentale

Tabelul 8.2 Mărimi fizice caracteristice impuse respectiv obținute în cadrul testelor de preparare a amestecului respirator HELIOX

Cod test	HELIOX (HeOx)									
	OM 3	OM 4	OM 5	ORt	HM 3	HM 4	HM 5	HRt	Analiză gaze	
	$p_{df, Ox}$	$p_{0, Ox}$	$p_{e, Ox}$	Citire rotametre	$p_{df, He}$	$p_{0, He}$	$p_{e, He}$	Citire rotametre	Ox	He
	[bar m]	[bar m]	[bar m]	[mm]	[bar m]	[bar m]	[bar m]	[mm]	[%]	[%]
1 HeOx	5*	4,8	0	33	7*	6,7	0	65	19,14	80,86
2 HeOx	5*	4,8	0	33	6*	5,8	0	52,5	21,21	78,79
3 HeOx	5*	4,8	0	33	5*	4,8	0	46	23,91	76,09
4 HeOx	5*	4,8	0	33	4*	3,9	0	38	27.03	72,97
5 HeOx	5*	4,8	0	33	3*	2,9	0	31	32,58	67,42
6 HeOx	5*	4,8	0	33	2,5*	2,4	0	28	35,10	64,90
7 HeOx	5*	4,8	0	33	2*	1,9	0	24	39,52	60,48

***** - valori impuse, stabilite în cadrul elaborării procedurii de efectuare a testelor experimentale

Tabelul 8.3 Mărimi fizice caracteristice impuse respectiv obținute în cadrul testelor de preparare a amestecului respirator TRIMIX

Cod test	TRIMIX (NiHeOx)												
	NM 3	NM 4	NM 5	NRt	HM 3	HM 4	HM 5	HRt	OM 3	OM 4	OM 5	ORt	**Analizor**
	$p_{df, Ni}$	$p_{0, Ni}$	$p_{e, Ni}$	Citire rotametre	$p_{df, He}$	$p_{0, He}$	$p_{e, He}$	Citire rotametre	$p_{df, Ox}$	$p_{0, Ox}$	$p_{e, Ox}$	Citire rotametre	**Ox**
	[bar m]	[bar m]	[bar m]	[mm]	[bar m]	[bar m]	[bar m]	[mm]	[bar m]	[bar m]	[bar m]	[mm]	[%]
1 TRi	4*	3,9	0	28	4*	3,9	0	37	3*	2,9	0	23	16,03
2 TRi	4*	3,9	0	28	4*	3,9	0	38	4*	3,9	0	27	18,92
3 TRi	4*	3,9	0	28	4*	3,9	0	38	5*	4,9	0	33	22,03
4 TRi	4*	3,9	0	28	4*	3,9	0	38	6*	5,6	0	37	24,62
5 TRi	4*	3,9	0	28	4*	3,9	0	37	7*	6,8	0	43	28,02

***** - valori impuse, stabilite în cadrul elaborării procedurii de efectuare a testelor experimentale

8.3.1 Relații pentru calculul debitelor masice și pentru calculul diametrelor ajutajelor de injecție masică de pe cele trei linii, funcție de citirile la rotametre

O primă etapă de calcul a constat în determinarea coeficienților de corecție (F) necesar a fi aplicați valorilor citite la rotametrele de pe cele trei linii (de oxigen – Ox, de azot – Ni și de heliu - He) funcție de temperatura de ieșire din ajutajul de injecție masică a gazului respectiv (θ_e), de presiunea de ieșire din ajutajul de injecție masică (p_e) și de densitatea gazului (ρ) la condițiile normale (0^oC și 1,013 bara).

$$F_{\mathrm{Ox}} = \left(\frac{273{,}16}{\theta_{\mathrm{e,Ox}} + 273{,}16}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{p_{\mathrm{e,Ox}}}{1{,}013}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{1{,}292}{\rho_{\mathrm{Ox}}}\right)^{0,5};$$

$$F_{\mathrm{Ni}} = \left(\frac{273{,}16}{\theta_{\mathrm{e,Ni}} + 273{,}16}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{p_{\mathrm{e,Ni}}}{1{,}013}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{1{,}292}{\rho_{\mathrm{Ni}}}\right)^{0,5}; \qquad (8.1)$$

$$F_{\mathrm{He}} = \left(\frac{273{,}16}{\theta_{\mathrm{e,He}} + 273{,}16}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{p_{\mathrm{e,He}}}{1{,}013}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{1{,}292}{\rho_{\mathrm{He}}}\right)^{0,5}.$$

Având în vedere unitățile de măsură ale mărimilor din grupul de relații 8.1, rezultă că factorul de corecție este o mărime adimensională:

$$\theta_e\left[{}^{\mathrm{o}}\mathrm{C}\right], p_e[\mathrm{bara}],\ \rho\ \left[\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}\right] \rightarrow F[-]$$

În calcule, valorile densităților gazelor de pe cele trei linii vor fi:

$$\rho_{\mathrm{Ox}} = 1{,}42\left[\mathrm{kg/m^3}\right],\ \rho_{\mathrm{Ni}} = 1{,}25\left[\mathrm{kg/m^3}\right],\ \rho_{\mathrm{He}} = 0{,}18\left[\mathrm{kg/m^3}\right]$$

Pornind de la factorii de corecție corespunzători fiecărei valori citite la rotametre, s-a calculat debitului masic de gaz injectat ($Q_{\mathrm{m}}^{\mathrm{inj}}$) funcție de debitul volumic gradat pentru aer, citit la rotametru (Q^{cit}), de coeficientul de corecție (F) și de constanta gazului respectiv (R), pentru liniile de oxigen – Ox, azot – Ni și respectiv heliu – He.

Având în vedere unitățile de măsură pentru fiecare termen din relațiile (8.2), și anume: $Q^{\mathrm{cit}}\left[\mathrm{cm_N^3/min}\right]$; $F[-]$; $R[\mathrm{J/(kg \cdot K)}]$, rezultă unitățile de măsură corespunzătoare debitului masic injectat $Q_{\mathrm{m}}^{\mathrm{inj}}[\mathrm{kg/s}]$.

Apoi s-a trecut la calcularea ariei colului ajutajelor de injecție masică (A) aferente celor trei linii, de oxigen – Ox, de azot – Ni și de heliu – He, funcție de debitul masic injectat $Q_{\mathrm{m}}^{\mathrm{inj}}$ de constanta gazului respectiv (R) de temperatura

(T_0) și presiunea (p_0) gazului la intrarea în ajutajul de injecție masică și de exponentul adiabatic al gazului respectiv (k).

$$Q_{\text{m, Ox}}^{\text{inj}} = \frac{Q_{\text{Ox}}^{\text{cit}} \cdot F_{\text{Ox}}}{R_{\text{Ox}} \cdot 175896};$$

$$Q_{\text{m, Ni}}^{\text{inj}} = \frac{Q_{\text{Ni}}^{\text{cit}} \cdot F_{\text{Ni}}}{R_{\text{Ni}} \cdot 175896}; \tag{8.2}$$

$$Q_{\text{m, He}}^{\text{inj}} = \frac{Q_{\text{He}}^{\text{cit}} \cdot F_{\text{He}}}{R_{\text{He}} \cdot 175896}.$$

Relațiile de calcul folosite pentru stabilirea valorii acestei mărimi sunt redate mai jos, fiind prezentate distinct, pentru fiecare linie:

$$A_{1,\text{Ox}} = \frac{Q_{\text{m, Ox}}^{\text{inj}} \cdot \sqrt{R_{\text{Ox}}}}{\left(\dfrac{2}{k_{\text{Ox}}+1}\right)^{\frac{1}{k_{\text{Ox}}-1}} \cdot \sqrt{\dfrac{2 \cdot k_{\text{Ox}}}{k_{\text{Ox}}+1}}} \cdot \frac{\sqrt{T_{0,\text{ Ox}}}}{p_{0,\text{Ox}} \cdot 10^5}$$

$$A_{1,\text{Ni}} = \frac{Q_{\text{m, Ni}}^{\text{inj}} \cdot \sqrt{R_{\text{Ni}}}}{\left(\dfrac{2}{k_{\text{Ni}}+1}\right)^{\frac{1}{k_{\text{Ni}}-1}} \cdot \sqrt{\dfrac{2 \cdot k_{\text{Ni}}}{k_{\text{Ni}}+1}}} \cdot \frac{\sqrt{T_{0,\text{ Ni}}}}{p_{0,\text{Ni}} \cdot 10^5} \tag{8.3}$$

$$A_{1,\text{He}} = \frac{Q_{\text{m, He}}^{\text{inj}} \cdot \sqrt{R_{\text{He}}}}{\left(\dfrac{2}{k_{\text{He}}+1}\right)^{\frac{1}{k_{\text{He}}-1}} \cdot \sqrt{\dfrac{2 \cdot k_{\text{He}}}{k_{\text{He}}+1}}} \cdot \frac{\sqrt{T_{0,\text{ He}}}}{p_{0,\text{He}} \cdot 10^5}$$

Calculul ariei colului ajutajelor de injecție masică (A), pentru cele trei linii, de oxigen – Ox, de azot – Ni și de heliu – He, se face funcție de debitul masic injectat $Q_{\text{m}}^{\text{inj}}$ de constanta gazului respectiv (R), de temperatura (T_0) și presiunea (p_0) gazului la intrarea în ajutajul de injecție masică și de exponentul adiabatic al gazului respectiv (k). În aceste relații, având în vedere unitățile de vedere ale diverselor mărimi $T_0\left[\text{K}\right]$, $R\left[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})\right]$, $Q_{\text{m}}^{\text{inj}}\left[\text{kg/s}\right]$, $p_0\left[\text{bara}\right] = p_0\left[\text{barm}\right] + 1\ \text{bara}$ și $k\left[-\right]$, rezultă unitatea de măsură a lui $A_1\left[\text{m}^2\right]$.

Expresiile presiunii gazului la intrarea în ajutajul de injecție masică, exprimată în scară absolută ($p_0\left[\text{bara}\right]$), funcție de aceeași presiune exprimată în scară manometrică ($p_0\left[\text{barm}\right]$) și de presiunea atmosferică exprimată în scară absolută bara, pentru liniile de oxigen – Ox, azot – Ni și heliu – He, sunt:

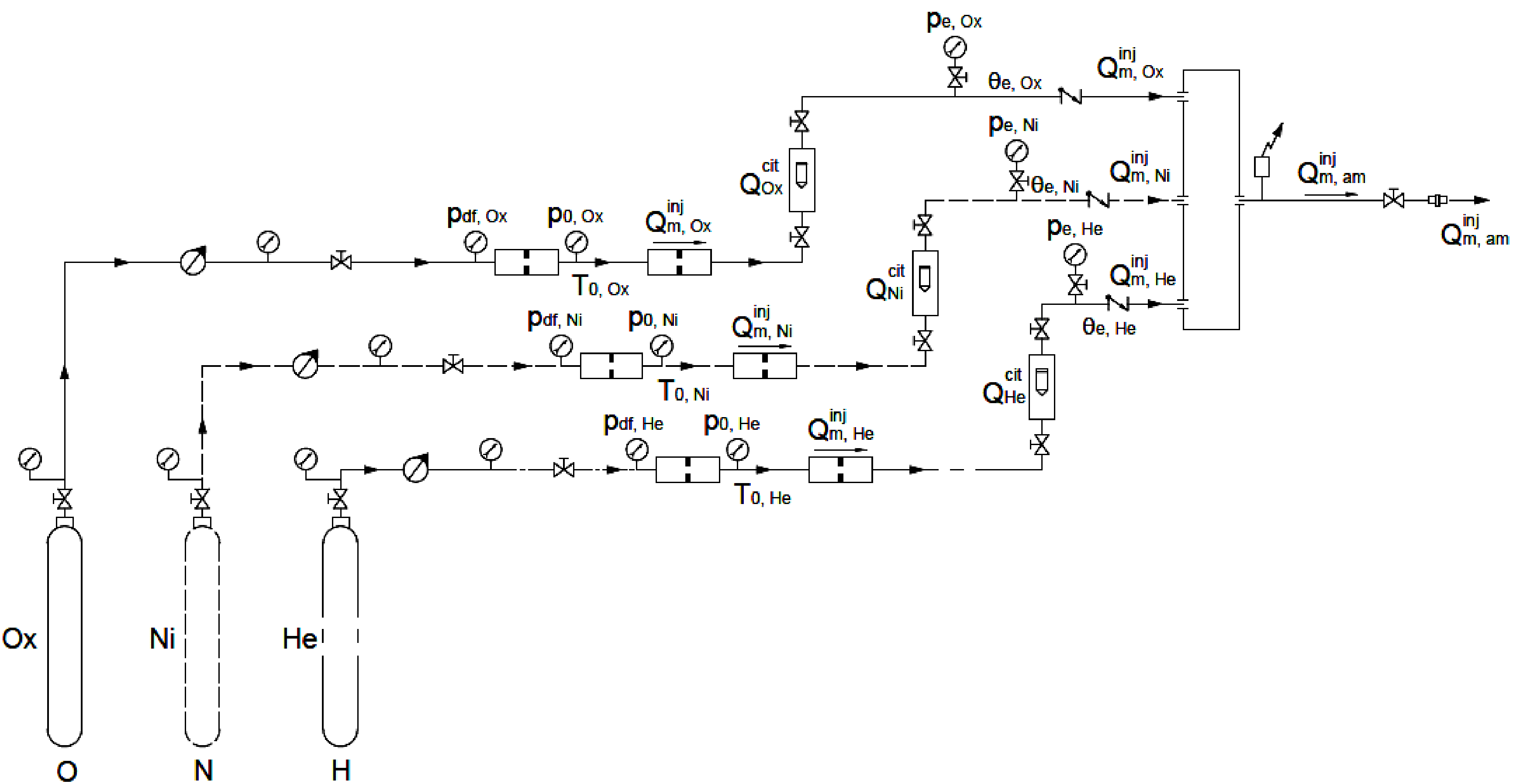


Figura 8.3 Mărimile fizice aferente gazelor vehiculate prin fiecare din cele trei linii ale instalației experimentale

$$p_{0,\text{Ox}}\left[\text{bara}\right] = p_{0,\text{Ox}}\left[\text{barm}\right] + 1\ \text{bara}$$

$$p_{0,\text{Ni}}\left[\text{bara}\right] = p_{0,\text{Ni}}\left[\text{barm}\right] + 1\ \text{bara} \qquad (8.4)$$

$$p_{0,\text{He}}\left[\text{bara}\right] = p_{0,\text{He}}\left[\text{barm}\right] + 1\ \text{bara}$$

Diametrul colului ajutajului de injecție masică (D_1), se obține funcție de aria acestui ajutaj (A_1). Pentru cele trei linii și anume oxigen – Ox, azot – Ni și heliu – He, pentru calculul diametrelor D_1 [mm] se scriu relațiile:

$$D_{1,\text{Ox}} = 1128,379 \cdot \sqrt{A_{1,\text{Ox}}}$$

$$D_{1,\text{Ni}} = 1128,379 \cdot \sqrt{A_{1,\text{Ni}}} \qquad (8.5)$$

$$D_{1,\text{He}} = 1128,379 \cdot \sqrt{A_{1,\text{He}}}$$

În aceste relații, introducând A_1 [mm], rezultă D_1.[mm].

8.3.2 Relații pentru calculul debitelor masice și volumice și pentru calculul presiunilor de alimentare a ajutajelor de injecție masică de pe cele trei linii, prin calculul termodinamic al ajutajelor

Determinarea valorii debitului masic injectat ($Q_{\text{m}}^{\text{inj}}$) prin ajutajul de injecție masică, se poate face funcție de aria colului ajutajului de injecție masică (A_1) de presiunea (p_0) și temperatura (T_0) ale gazului la intrarea în acest ajutaj, de constanta gazului injectat (R) și de exponentul adiabatic (k) al gazului respectiv, pentru liniile de oxigen – Ox, azot – Ni și heliu – He. Relațiile de calcul corespunzătoare debitelor masice injectate pe cele trei linii sunt:

$$Q_{\text{m, Ox}}^{\text{inj}} = A_{1,\text{Ox}} \left(\frac{2}{k_{\text{Ox}} + 1} \right)^{\frac{1}{k_{\text{Ox}} - 1}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k_{\text{Ox}}}{k_{\text{Ox}} + 1}} \cdot \frac{p_{0,\text{Ox}} \cdot 10^5}{\sqrt{T_{0,\text{Ox}} \cdot R_{\text{Ox}}}}$$

$$Q_{\text{m, Ni}}^{\text{inj}} = A_{1,\text{Ni}} \left(\frac{2}{k_{Ni} + 1} \right)^{\frac{1}{k_{\text{Ni}} - 1}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k_{\text{Ni}}}{k_{\text{Ni}} + 1}} \cdot \frac{p_{0,\text{Ni}} \cdot 10^5}{\sqrt{T_{0,\text{Ni}} \cdot R_{\text{Ni}}}} \qquad (8.6)$$

$$Q_{\text{m, He}}^{\text{inj}} = A_{1,\text{He}} \left(\frac{2}{k_{\text{He}} + 1} \right)^{\frac{1}{k_{\text{He}} - 1}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k_{\text{He}}}{k_{\text{He}} + 1}} \cdot \frac{p_{0,\text{He}} \cdot 10^5}{\sqrt{T_{0,\text{He}} \cdot R_{\text{He}}}}$$

Analizând din punct de vedere unităților de măsură ecuațiile din alcătuirea grupului de relațiile matematice (8.6), în care: A_1[m^2], T_0[K], R[J/(kg·K)], k[-], p_0[bara], rezultă unitățile de măsură în sistem internațional pentru debitului masic injectat $Q_{\mathrm{m}}^{\mathrm{inj}}\left[\mathrm{kg/s}\right]$, similar celor obținute pentru grupul de relații (8.2).

Determinarea valorii debitului pentru fiecare gaz injectat pe cele trei linii de injecție, se face funcție de debitul masic calculat cu relația corespunzătoare din alcătuirea grupului de ecuații (7.6), respectiv de constanta gazului injectat (R) și pentru debitul de gaz citit la rotametru exprimat în aer de coeficientul de corecție (F). Pentru fiecare din cele trei linii, oxigen – Ox, azot – Ni și heliu – He, se determină debitul volumic de gaz injectat exprimat în diferite unități de măsură în condiții normale și debitul volumic de gaz citit la rotametru exprimat în aer (Q^{cit}) utilizând grupuri de relații (8.7), (8.8) și (8.9).

Pentru linia oxigenului – Ox, grupul de relații corespunzător este:

$$Q_{\mathrm{Ox}}^{\mathrm{inj}} = \frac{Q_{\mathrm{m,Ox}}^{\mathrm{inj}} \cdot R_{\mathrm{Ox}}}{341{,}11} \left[\frac{\mathrm{m_N^3}}{\mathrm{s}}\right]$$

$$Q_{\mathrm{Ox}}^{\mathrm{inj}} = Q_{\mathrm{m,Ox}}^{\mathrm{inj}} \cdot R_{\mathrm{Ox}} \cdot 175{,}896 \left[\frac{\mathrm{l_N}}{\mathrm{min}}\right]$$

(8.7)

$$Q_{\mathrm{Ox}}^{\mathrm{inj}} = Q_{\mathrm{m,Ox}}^{\mathrm{inj}} \cdot R_{\mathrm{Ox}} \cdot 175896 \left[\frac{\mathrm{cm_N^3}}{\mathrm{min}}\right]$$

$$Q_{\mathrm{Ox}}^{\mathrm{cit}} = \frac{Q_{\mathrm{Ox}}^{\mathrm{inj}}}{F_{\mathrm{Ox}}} \left[\frac{\mathrm{cm_N^3}}{\mathrm{min}}\right]$$

Pentru linia azotului – Ni, grupul de relații corespunzător este:

$$Q_{\mathrm{Ni}}^{\mathrm{inj}} = \frac{Q_{\mathrm{m,Ni}}^{\mathrm{inj}} \cdot R_{\mathrm{Ni}}}{341{,}11} \left[\frac{\mathrm{m_N^3}}{\mathrm{s}}\right]$$

$$Q_{\mathrm{Ni}}^{\mathrm{inj}} = Q_{\mathrm{m,Ni}}^{\mathrm{inj}} \cdot R_{\mathrm{Ni}} \cdot 175{,}896 \left[\frac{\mathrm{l_N}}{\mathrm{min}}\right]$$

(8.8)

$$Q_{\mathrm{Ni}}^{\mathrm{inj}} = Q_{\mathrm{m,Ni}}^{\mathrm{inj}} \cdot R_{\mathrm{Ni}} \cdot 175896 \left[\frac{\mathrm{cm_N^3}}{\mathrm{min}}\right]$$

$$Q_{Ni}^{cit} = \frac{Q_{Ni}^{inj}}{F_{Ni}} \left[\frac{cm_N^3}{min}\right]$$

Pentru linia azotului – He, grupul de relații corespunzător este:

$$Q_{He}^{inj} = \frac{Q_{m,He}^{inj} \cdot R_{He}}{341,11} \left[\frac{m_N^3}{s}\right]$$

$$Q_{He}^{inj} = Q_{m,He}^{inj} \cdot R_{He} \cdot 175,896 \left[\frac{l_N}{min}\right]$$

(8.9)

$$Q_{He}^{inj} = Q_{m,He}^{inj} \cdot R_{He} \cdot 175896 \left[\frac{cm_N^3}{min}\right]$$

$$Q_{He}^{cit} = \frac{Q_{He}^{inj}}{F_{He}} \left[\frac{cm_N^3}{min}\right]$$

Calculul presiunii gazului la intrarea în ajutajul de injecție masică (p_0), funcție de debitul masic injectat (Q_m^{inj}), de aria colului ajutajului de injecție masică (A_1), de temperatura gazului la intrarea în acest ajutaj (T_0) și de exponentul adiabatic al gazului respectiv (k), pentru liniile de oxigen – Ox, azot – Ni și heliu – He, se face cu relațiile prezentate în continuare:

$$p_{0,Ox} = \frac{Q_{m,\,Ox}^{inj} \cdot \sqrt{T_{0,Ox} \cdot R_{Ox}}}{10^5 \cdot A_{1,Ox} \left(\frac{2}{k_{Ox}+1}\right)^{\frac{1}{k_{Ox}-1}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k_{Ox}}{k_{Ox}+1}}}$$

$$p_{0,Ni} = \frac{Q_{m,\,Ni}^{inj} \cdot \sqrt{T_{0,Ni} \cdot R_{Ni}}}{10^5 \cdot A_{1,Ni} \left(\frac{2}{k_{Ni}+1}\right)^{\frac{1}{k_{Ni}-1}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k_{Ni}}{k_{Ni}+1}}} \qquad (8.10)$$

$$p_{0,He} = \frac{Q_{m,\,He}^{inj} \cdot \sqrt{T_{0,He} \cdot R_{He}}}{10^5 \cdot A_{1,He} \left(\frac{2}{k_{He}+1}\right)^{\frac{1}{k_{He}-1}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k_{He}}{k_{He}+1}}}$$

unde $A_1\left[m^2\right]$, $T_0[K]$, $R\left[J/(kg \cdot K)\right]$, $k[-]$, $Q_m^{inj}[kg/s]$, $p_0[bara]$ rezultând, $p_0[bara]$ de unde se obține $p_0[barm] = p_0[bara] - 1bara$.

Pentru calculele efectuate în relațiile (8.10), valorile exponenților adiabatici ai gazelor (k) și constantele gazelor injectate (R) sunt:

$$k_{\mathrm{Ox}} = 1,394 \quad k_{\mathrm{Ni}} = 1,399 \quad k_{\mathrm{He}} = 1,659$$

$$R_{\mathrm{Ox}} = 260 \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{K}} \quad R_{\mathrm{Ni}} = 297 \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{K}} \quad R_{\mathrm{He}} = 2079 \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{K}}$$

8.3.3 Relații pentru calculul diametrelor diafragmelor de măsură și pentru calculul debitelor masice pe cele trei linii funcție de aria colului ajutajelor

Calculul ariei colului diafragmei de măsură (A_{df}) funcție de debitul masic de gaz injectat ($Q_{\mathrm{m}}^{\mathrm{inj}}$), de presiunea gazului la alimentarea diafragmei (p_{df}), de presiunea (p_0) și temperatura (T_0) ale gazului la alimentarea ajutajului de injecție masică, de constanta gazului respectiv (R) și de exponentul adiabatic al gazului respectiv (k), pentru liniile de oxigen – Ox, azot – Ni și heliu – He, a fost făcut pe baza relațiilor matematice prezentate în continuare.

$$A_{\mathrm{df,Ox}} = \frac{Q_{\mathrm{m,\,Ox}}^{\mathrm{inj}}}{p_{\mathrm{df,Ox}} \cdot 10^5 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k_{\mathrm{Ox}}}{k_{\mathrm{Ox}} - 1} \cdot \frac{1}{R_{\mathrm{Ox}} \cdot T_{0,\mathrm{Ox}}} \cdot \left[\left(\frac{p_{0,\mathrm{Ox}}}{p_{\mathrm{df,Ox}}} \right)^{\frac{2}{k_{\mathrm{Ox}}}} - \left(\frac{p_{0,\mathrm{Ox}}}{p_{\mathrm{df,Ox}}} \right)^{\frac{k_{\mathrm{Ox}}+1}{k_{\mathrm{Ox}}}} \right]}}$$

$$A_{\mathrm{df,Ni}} = \frac{Q_{\mathrm{m,\,Ni}}^{\mathrm{inj}}}{p_{\mathrm{df,Ni}} \cdot 10^5 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k_{\mathrm{Ni}}}{k_{\mathrm{Ni}} - 1} \cdot \frac{1}{R_{\mathrm{Ni}} \cdot T_{0,\mathrm{Ni}}} \cdot \left[\left(\frac{p_{0,\mathrm{Ni}}}{p_{\mathrm{df,Ni}}} \right)^{\frac{2}{k_{\mathrm{Ni}}}} - \left(\frac{p_{0,\mathrm{Ni}}}{p_{\mathrm{df,Ni}}} \right)^{\frac{k_{\mathrm{Ni}}+1}{k_{\mathrm{Ni}}}} \right]}} \qquad (8.11)$$

$$A_{\mathrm{df,He}} = \frac{Q_{\mathrm{m,\,He}}^{\mathrm{inj}}}{p_{\mathrm{df,He}} \cdot 10^5 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k_{\mathrm{He}}}{k_{\mathrm{He}} - 1} \cdot \frac{1}{R_{\mathrm{He}} \cdot T_{0,\mathrm{He}}} \cdot \left[\left(\frac{p_{0,\mathrm{He}}}{p_{\mathrm{df,He}}} \right)^{\frac{2}{k_{\mathrm{He}}}} - \left(\frac{p_{0,\mathrm{He}}}{p_{\mathrm{df,He}}} \right)^{\frac{k_{\mathrm{He}}+1}{k_{\mathrm{He}}}} \right]}}$$

Introducând în aceste relații $T_0 [\mathrm{K}]$, $R \left[\mathrm{J} / (\mathrm{kg} \cdot \mathrm{K}) \right]$, $Q_{\mathrm{m}}^{\mathrm{inj}} [\mathrm{kg/s}]$, $p_{\mathrm{df}} [\mathrm{bara}] = p_{\mathrm{df}} [\mathrm{barm}] + 1\ \mathrm{bara}$, $p_0 [\mathrm{bara}] = p_0 [\mathrm{barm}] + 1\ \mathrm{bara}$, $k [-]$, rezultă $A_{\mathrm{df}} \left[\mathrm{m}^2 \right]$.

Valoarea presiunii gazului la intrarea în diafragma de măsurare a debitului de gaz (p_{df}) depinde de presiunea gazului la intrarea în ajutajul de injecție masică (p_0) și de diferența de presiune care apare pe diafragma de măsură

(Δp_{df}). Astfel, pentru cele trei linii de oxigen – Ox, azot – Ni și heliu – H, relațiile corespunzătoare sunt:

$$p_{\mathrm{df,Ox}} = p_{0,\mathrm{Ox}} + \Delta p_{\mathrm{df,Ox}}$$
$$p_{\mathrm{df,Ni}} = p_{0,\mathrm{Ni}} + \Delta p_{\mathrm{df,Ni}} \qquad (8.12)$$
$$p_{\mathrm{df,He}} = p_{0,\mathrm{He}} + \Delta p_{\mathrm{df,He}}$$

Calculul diametrului colului diafragmei de măsură (D_{df}) se obține funcție de aria colului acestei diafragme (A_{df}). Pentru cele trei linii, de oxigen - Ox, azot – Ni și heliu – He, relațiile de calcul ale acestei mărimi geometrice sunt:

$$D_{\mathrm{df,Ox}} = 1128{,}379 \cdot \sqrt{A_{\mathrm{df,Ox}}}$$
$$D_{\mathrm{df,Ni}} = 1128{,}379 \cdot \sqrt{A_{\mathrm{df,Ni}}} \qquad (8.13)$$
$$D_{\mathrm{df,He}} = 1128{,}379 \cdot \sqrt{A_{\mathrm{df,He}}}$$

Introducând $A_{\mathrm{df}}[\mathrm{m}^2]$, rezultă $D_{\mathrm{df}}[\mathrm{mm}]$.

Calculul debitului masic injectat ($Q_{\mathrm{m}}^{\mathrm{inj}}$) funcție de aria colului diafragmei de măsură (A_{df}) de presiunea gazului la intrarea în diafragma de măsură (p_{df}), de presiunea (p_0) și temperatura (T_0) a gazului la ieșirea în diafragma de măsură, de constanta gazului (R) și de exponentul adiabatic al gazului respectiv (k), pentru liniile de oxigen – Ox, azot – Ni și heliu – He, se determină folosind următorul grup de relații matematice:

$$Q_{\mathrm{m,Ox}}^{\mathrm{inj}} = A_{\mathrm{df,Ox}} \cdot p_{\mathrm{df,Ox}} \cdot 10^5 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k_{\mathrm{Ox}}}{k_{\mathrm{Ox}} - 1} \cdot \frac{1}{R_{\mathrm{Ox}} \cdot T_{0,\mathrm{Ox}}} \cdot \left[\left(\frac{p_{0,\mathrm{Ox}}}{p_{\mathrm{df,Ox}}} \right)^{\frac{2}{k_{\mathrm{Ox}}}} - \left(\frac{p_{0,\mathrm{Ox}}}{p_{\mathrm{df,Ox}}} \right)^{\frac{k_{\mathrm{Ox}}+1}{k_{\mathrm{Ox}}}} \right]}$$

$$Q_{\mathrm{m,Ni}}^{\mathrm{inj}} = A_{\mathrm{df,Ni}} \cdot p_{\mathrm{df,Ni}} \cdot 10^5 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k_{\mathrm{Ni}}}{k_{\mathrm{Ni}} - 1} \cdot \frac{1}{R_{\mathrm{Ni}} \cdot T_{0,\mathrm{Ni}}} \cdot \left[\left(\frac{p_{0,\mathrm{Ni}}}{p_{\mathrm{df,Ni}}} \right)^{\frac{2}{k_{\mathrm{Ni}}}} - \left(\frac{p_{0,\mathrm{Ni}}}{p_{\mathrm{df,Ni}}} \right)^{\frac{k_{\mathrm{Ni}}+1}{k_{\mathrm{Ni}}}} \right]} \qquad (8.14)$$

$$Q_{\mathrm{m,He}}^{\mathrm{inj}} = A_{\mathrm{df,He}} \cdot p_{\mathrm{df,He}} \cdot 10^5 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k_{\mathrm{He}}}{k_{\mathrm{He}} - 1} \cdot \frac{1}{R_{\mathrm{He}} \cdot T_{0,\mathrm{He}}} \cdot \left[\left(\frac{p_{0,\mathrm{He}}}{p_{\mathrm{df,He}}} \right)^{\frac{2}{k_{\mathrm{He}}}} - \left(\frac{p_{0,\mathrm{He}}}{p_{\mathrm{df,He}}} \right)^{\frac{k_{\mathrm{He}}+1}{k_{\mathrm{He}}}} \right]}$$

În aceste relații, introducând $T_0[\mathrm{K}]$, $R[\mathrm{J/(kg \cdot K)}]$, $k[-]$, $A_{df}[\mathrm{m^2}]$, $p_{df}[\mathrm{bara}] = p_{df}[\mathrm{barm}] + 1\ \mathrm{bara}$, $p_0[\mathrm{bara}] = p_0[\mathrm{barm}] + 1\ \mathrm{bara}$ rezultă $Q_m^{inj}[\mathrm{kg/s}]$.

Valoarea presiunii gazului la intrarea în diafragma de măsură, exprimată în scară absolută ($p_{df}[\mathrm{bara}]$), funcție de aceeași presiune exprimată în scară manometrică ($p_{df}[\mathrm{barm}]$) și de presiunea atmosferică exprimată în scară absolută (1 bara), pentru liniile de oxigen – Ox, azot – Ni și heliu – He, se obține aplicând relația corespunzătoare dintre cele trei relații ale grupului (8.15).

$$p_{df,Ox}[\mathrm{bara}] = p_{df,Ox}[\mathrm{barm}] + 1\ \mathrm{bara}$$
$$p_{df,Ni}[\mathrm{bara}] = p_{df,Ni}[\mathrm{barm}] + 1\ \mathrm{bara} \qquad (8.15)$$
$$p_{df,He}[\mathrm{bara}] = p_{df,He}[\mathrm{barm}] + 1\ \mathrm{bara}$$

8.3.4 Relații pentru calculul debitului masic de amestec injectat și a participațiilor masice si volumice ale componentelor, pentru amestecurile NITROX, HELIOX și TRIMIX

În continuare sunt prezentate relațiile prin care sunt exprimate debitul masic de amestec binar sau ternar injectat ($Q_{m,am}^{inj}$), participația masică a fiecărui gaz din amestecul injectat (m^{inj}), constanta specifică a amestecului injectat (R_{am}^{inj}), corespunzătoare fiecărui amestec studiat și participația volumică a fiecărui gaz din amestecul injectat (r^{inj}):

- pentru amestecul binar NITROX

$$Q_{m,NiOx}^{inj} = Q_{m,Ox}^{inj} + Q_{m,Ni}^{inj} \qquad (8.16)$$

$$m_{Ox}^{inj} = \frac{Q_{m,Ox}^{inj}}{Q_{m,NiOx}^{inj}} \quad m_{Ni}^{inj} = \frac{Q_{m,Ni}^{inj}}{Q_{m,NiOx}^{inj}} \qquad (8.17), (8.18)$$

$$R_{NiOx}^{inj} = m_{Ox}^{inj} \cdot R_{Ox} + m_{Ni}^{inj} \cdot R_{Ni} \qquad (8.19)$$

$$r_{Ox}^{inj} = m_{Ox}^{inj} \cdot \frac{R_{Ox}}{R_{NiOx}^{inj}} \quad r_{Ni}^{inj} = m_{Ni}^{inj} \cdot \frac{R_{Ni}}{R_{NiOx}^{inj}} \qquad (8.20), (8.21)$$

- pentru amestecul binar HELIOX

$$Q_{m,HeOx}^{inj} = Q_{m,Ox}^{inj} + Q_{m,He}^{inj} \qquad (8.22)$$

$$m_{\text{Ox}}^{\text{inj}} = \frac{Q_{\text{m,Ox}}^{\text{inj}}}{Q_{\text{m,HeOx}}^{\text{inj}}} \quad m_{\text{He}}^{\text{inj}} = \frac{Q_{\text{m,He}}^{\text{inj}}}{Q_{\text{m,HeOx}}^{\text{inj}}} \qquad (8.23), (8.24)$$

$$R_{\text{HeOx}}^{\text{inj}} = m_{\text{Ox}}^{\text{inj}} \cdot R_{\text{Ox}} + m_{\text{He}}^{\text{inj}} \cdot R_{\text{He}} \qquad (8.25)$$

$$r_{\text{Ox}}^{\text{inj}} = m_{\text{Ox}}^{\text{inj}} \cdot \frac{R_{\text{Ox}}}{R_{\text{HeOx}}^{\text{inj}}} \quad r_{\text{He}}^{\text{inj}} = m_{\text{He}}^{\text{inj}} \cdot \frac{R_{\text{He}}}{R_{\text{HeOx}}^{\text{inj}}} \qquad (8.26), (8.27)$$

- pentru amestecul ternar TRIMIX

$$Q_{\text{m,NiHeOx}}^{\text{inj}} = Q_{\text{m,Ox}}^{\text{inj}} + Q_{\text{m,Ni}}^{\text{inj}} + Q_{\text{m,He}}^{\text{inj}} \qquad (8.28)$$

$$m_{\text{Ox}}^{\text{inj}} = \frac{Q_{\text{m,Ox}}^{\text{inj}}}{Q_{\text{m,NiHeOx}}^{\text{inj}}} \quad m_{\text{Ni}}^{\text{inj}} = \frac{Q_{\text{m,Ni}}^{\text{inj}}}{Q_{\text{m,NiHeOx}}^{\text{inj}}} \quad m_{\text{He}}^{\text{inj}} = \frac{Q_{\text{m,He}}^{\text{inj}}}{Q_{\text{m,NiHeOx}}^{\text{inj}}} \qquad (8.29), (8.30), (8.31)$$

$$R_{\text{NiHeOx}}^{\text{inj}} = m_{\text{Ox}}^{\text{inj}} \cdot R_{\text{Ox}} + m_{\text{Ni}}^{\text{inj}} \cdot R_{\text{Ni}} + m_{\text{He}}^{\text{inj}} \cdot R_{\text{He}} \qquad (8.32)$$

$$r_{\text{Ox}}^{\text{inj}} = m_{\text{Ox}}^{\text{inj}} \cdot \frac{R_{\text{Ox}}}{R_{\text{NiHeOx}}^{\text{inj}}} \quad r_{\text{Ni}}^{\text{inj}} = m_{\text{Ni}}^{\text{inj}} \cdot \frac{R_{\text{Ni}}}{R_{\text{NiHeOx}}^{\text{inj}}} \quad r_{\text{He}}^{\text{inj}} = m_{\text{He}}^{\text{inj}} \cdot \frac{R_{\text{He}}}{R_{\text{NiHeOx}}^{\text{inj}}} \qquad (8.33), (8.34), (8.35)$$

unde: $Q_{\text{m}}^{\text{inj}}\left[\text{kg/s}\right]$, $R\left[\text{J}/\left(\text{kg}\cdot\text{K}\right)\right]$, $m[\text{-}]$, $r[\text{-}]$.

8.3.5 Condițiile de funcționare în regim critic a ajutajelor de injecție masică de pe cele trei linii

Presiunea minimă a gazului la intrarea în ajutajul de injecție masică (p_0), funcție de presiunea la ieșirea din ajutajul de injecție masică (p_e), pentru ca acest ajutaj să lucreze în regim critic (sonic) se determină pornind de la condiția:

$$\frac{p_{\text{e}}}{p_0} \leq \frac{p_{\text{cr}}}{p_0} \qquad (8.36)$$

Relația dintre rapoartele ce alcătuiesc această condiție și debitul masic injectat este reprezentată grafic în figura 6.7 – (d), din cadrul capitolului 6 al lucrării de față.

Deoarece:

$$\frac{p_{cr}}{p_0} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \qquad (8.37)$$

și având în vedere relația (8.36) rezultă că:

$$\frac{p_e}{p_0} \le \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \tag{8.38}$$

Pornind de la relația (8.37) s-au stabilit valorile raportului respectiv pentru cele trei linii de injecție, oxigen – Ox, azot- Ni și heliu – He:

$$\frac{p_{\text{cr, Ox}}}{p_{\text{0, Ox}}} = \left(\frac{2}{k_{\text{Ox}}+1} \right)^{\frac{k_{\text{Ox}}}{k_{\text{Ox}}-1}} = \left(\frac{2}{1,394+1} \right)^{\frac{1,394}{1,394-1}} = 0,525$$

$$\frac{p_{\text{cr, Ni}}}{p_{\text{0, Ni}}} = \left(\frac{2}{k_{\text{Ni}}+1} \right)^{\frac{k_{\text{Ni}}}{k_{\text{Ni}}-1}} = \left(\frac{2}{1,399+1} \right)^{\frac{1,399}{1,399-1}} = 0,528$$

$$\frac{p_{\text{cr, He}}}{p_{\text{0, He}}} = \left(\frac{2}{k_{\text{He}}+1} \right)^{\frac{k_{\text{He}}}{k_{\text{He}}-1}} = \left(\frac{2}{1,659+1} \right)^{\frac{1,659}{1,659-1}} = 0,488$$

În consecință, raportul p_e / p_0 pentru liniile de oxigen – Ox, azot – Ni și heliu – He, va trebui să fie mai mic, la limită egal, cu valorile calculate anterior, rezultând inegalitățile:

$$\frac{p_{\text{e, Ox}}}{p_{\text{0, Ox}}} \le 0,525 \quad \frac{p_{\text{e, Ni}}}{p_{\text{0, Ni}}} \le 0,528 \quad \frac{p_{\text{0, He}}}{p_{\text{0, He}}} \le 0,488 \tag{8.39}$$

Astfel, valorile presiunii minime a gazului la intrarea în ajutajul de injecție masică (p_0), pentru ca funcționarea ajutajului de injecție să se producă în regim critic, vor trebui să respecte următoarele condiții, pentru liniile de oxigen – Ox, azot – Ni și heliu – He:

$$p_{\text{0, Ox}} [\text{bara}] \ge 1,90 \cdot p_{\text{e, Ox}} [\text{bara}]$$

$$p_{\text{0, Ox}} [\text{barm}] + 1 \ge 1,90 \left(p_{\text{e, Ox}} [\text{barm}] + 1 [\text{bara}] \right)$$

$$p_{\text{0, Ni}} [\text{bara}] \ge 1,89 \cdot p_{\text{e, Ni}} [\text{bara}] \tag{8.40}$$

$$p_{\text{0, Ni}} [\text{barm}] + 1 \ge 1,89 \left(p_{\text{Ni}} [\text{barm}] + 1 [\text{bara}] \right)$$

$$p_{\text{0, He}} [\text{bara}] \ge 2,05 \cdot p_{\text{e, He}} [\text{bara}]$$

$$p_{\text{0, He}} [\text{barm}] + 1 \ge 2,05 \left(p_{\text{e, He}} [\text{barm}] + 1 [\text{bara}] \right)$$

Calculul presiunii gazului la ieșirea din ajutajul de injecție masică, exprimată în scară absolută ($p_e[\text{bara}]$) funcție de aceeași presiune exprimată în scară manometrică ($p_e[\text{barm}]$) și de presiunea atmosferică exprimată în scară absolută (1 bara), pentru liniile de oxigen – Ox, azot – Ni și heliu – He se va face cu relațiile:

$$p_{e,Ox}[\text{bara}] = p_{e,Ox}[\text{barm}] + 1\ \text{bara}$$

$$p_{e,Ni}[\text{bara}] = p_{e,Ni}[\text{barm}] + 1\ \text{bara}$$

$$p_{e,He}[\text{bara}] = p_{e,He}[\text{barm}] + 1\ \text{bara}$$

8.3.6 Relații practice de calcul a ariei și diametrului colului ajutajului de injecție masică, a debitului masic injectat și a presiunii de alimentare a ajutajului, prin calculul ajutajului sonic și prin citirile la rotametru, pentru cele trei linii

Pentru linia oxigenului – Ox, înlocuind k_{Ox} cu valoarea de 1,394, R_{Ox} cu valoarea de 260 J/(kg·K) și $T_{0,Ox}$ T0,Oxcu valoarea de 293,16 K, și efectuând calculele rezultă:

$$\frac{2}{k_{Ox}+1} = \frac{2}{1,394+1} = 0,835 \qquad \frac{1}{k_{Ox}-1} = \frac{1}{1,394-1} = 2,838$$

$$\frac{2\cdot k_{Ox}}{k_{Ox}+1} = \frac{2\cdot 1,394}{1,394+1} = 1,164 \qquad \left(\frac{2}{k_{Ox}+1}\right)^{\frac{1}{k_{Ox}-1}} = 0,835^{2,538} = 0,632$$

$$\sqrt{\frac{2\cdot k_{Ox}}{k_{Ox}+1}} = \sqrt{1,164} = 1,079 \qquad \sqrt{R_{Ox}} = \sqrt{260} = 16,124\left[\left(J/(kg\cdot K)^{1/2}\right)\right]$$

$$\sqrt{T_{0,Ox}} = \sqrt{293,16} = 17,122$$

Relațiile corespunzătoare liniei **oxigenului – Ox** din grupurile de ecuații (8.3), (8.6) și (8.10) se pot scrie, după înlocuirea valorilor obținute anterior, într-o formă simplificată după cum urmează:

$$A_{1,Ox} = \frac{Q_{m,Ox}^{inj}\cdot 16,124\cdot 17,122}{0,632\cdot 1,079\cdot p_{0,Ox}\cdot 10^5} = \frac{404,845}{10^5}\cdot\frac{Q_{m,Ox}^{inj}}{p_{0,Ox}} \qquad (8.41)$$

$$Q_{m,Ox}^{inj}=\frac{A_{1,Ox}\cdot 0,632\cdot 1,079\cdot p_{0,Ox}\cdot 10^5}{16,124\cdot 17,122}=247,00\cdot A_{1,Ox}\cdot p_{0,Ox} \tag{8.42}$$

$$p_{0,Ox}=\frac{Q_{m,Ox}^{inj}\cdot 16,124\cdot 17,122}{10^5\cdot A_{1,Ox}\cdot 0,632\cdot 1,079}=\frac{404,845}{10^5}\cdot\frac{Q_{m,Ox}^{inj}}{A_{1,Ox}} \tag{8.43}$$

unde: $A_{1,Ox}\left[\mathrm{m}^2\right]$ $Q_{m,Ox}^{inj}\left[\mathrm{kg/s}\right]$, $T_0\left[K\right]$ iar $p_{0,Ox}\left[\mathrm{bara}\right]$.

Dar, pentru aria colului ajutajului de injecție a oxigenului se poate scrie relația:

$$A_{1,Ox}=7,854\cdot 10^{-7}\cdot D_{1,Ox}^2 \tag{8.44}$$

unde, introducând $D_{1,Ox}\left[\mathrm{mm}\right]$ rezultă $A_{1,Ox}\left[\mathrm{m}^2\right]$.

Pentru linia azotului – Ni, înlocuind k_{Ni} cu valoarea de 1,399, R_{Ni} cu valoarea de 297 J/(kg·K) și $T_{0,Ni}$ cu valoarea de 293,16 K, și efectuând calculele rezultă:

$$\frac{2}{k_{Ni}+1}=\frac{2}{1,399+1}=0,834 \qquad \frac{1}{k_{Ni}-1}=\frac{1}{1,399-1}=2,506$$

$$\frac{2\cdot k_{Ni}}{k_{Ni}+1}=\frac{2\cdot 1,399}{1,399+1}=1,166 \qquad \left(\frac{2}{k_{Ni}+1}\right)^{\frac{1}{k_{Ni}-1}}=0,834^{2,506}=0,634$$

$$\sqrt{\frac{2\cdot k_{Ni}}{k_{Ni}+1}}=\sqrt{1,166}=1,080 \qquad \sqrt{R_{Ni}}=\sqrt{297}=17,233\ \left[\left(\mathrm{J/(kg\cdot K)}\right)^{1/2}\right]$$

$$\sqrt{T_{0,Ni}}=\sqrt{293,16}=17,122$$

valori, care introduse în relațiile din grupurile de ecuații (8.3), (8.6) și (8.10), corespunzătoare liniei de **azot - Ni**, duc la obținerea unei forme simplificate pentru calculul mărimilor geometrice și termo-hidraulice respective.

$$A_{1,Ni}=\frac{Q_{m,Ni}^{inj}\cdot 17,233\cdot 17,122}{0,634\cdot 1,080\cdot p_{0,Ni}\cdot 10^5}=\frac{430,925}{10^5}\cdot\frac{Q_{m,Ni}^{inj}}{p_{0,Ni}} \tag{8.45}$$

$$Q_{m,Ni}^{inj}=\frac{A_{1,Ni}\cdot 0,634\cdot 1,080\cdot p_{0,Ni}\cdot 10^5}{17,233\cdot 17,122}=232,058\cdot A_{1,Ni}\cdot p_{0,Ni} \tag{8.46}$$

$$p_{0,Ni}=\frac{Q_{m,Ni}^{inj}\cdot 17,233\cdot 17,122}{10^5\cdot A_{1,Ni}\cdot 0,634\cdot 1,080}=\frac{430,925}{10^5}\cdot\frac{Q_{m,Ni}^{inj}}{A_{1,Ni}} \tag{8.47}$$

unde: $A_{1,\mathrm{Ni}}\left[\mathrm{m}^2\right]$ $Q_{\mathrm{m,Ni}}^{\mathrm{inj}}\left[\mathrm{kg/s}\right]$, $T_0\left[K\right]$ iar $p_{0,\mathrm{Ni}}\left[\mathrm{bara}\right]$.

Dar, pentru aria colului ajutajului de injecție a azotului se poate scrie relația:

$$A_{1,\mathrm{Ni}} = 7,854\cdot 10^{-7}\cdot D_{1,\mathrm{Ni}}^2 \tag{8.48}$$

unde, introducând $D_{1,\mathrm{Ni}}\left[\mathrm{mm}\right]$ rezultă $A_{1,\mathrm{Ni}}\left[\mathrm{m}^2\right]$.

Pentru linia **heliului – He**, urmând aceleași etape, ca și în cazul liniei oxigenului – Ox și respectiv liniei azotului – Ni, se efectuează, în prima fază, următoarele înlocuiri: k_{He} ia valoarea de 1,659, R_{He} valoarea de 2079 J/(kg·K) iar $T_{0,\mathrm{He}}$ valoarea de 293,16 K, și efectuând calculele rezultă:

$$\frac{2}{k_{\mathrm{He}}+1} = \frac{2}{1,659+1} = 0,752 \qquad \frac{1}{k_{\mathrm{He}}-1} = \frac{1}{1,659-1} = 1,517$$

$$\frac{2\cdot k_{\mathrm{He}}}{k_{\mathrm{He}}+1} = \frac{2\cdot 1,659}{1,659+1} = 1,248 \qquad \left(\frac{2}{k_{\mathrm{He}}+1}\right)^{\frac{1}{k_{\mathrm{He}}-1}} = 0,752^{1,517} = 0,649$$

$$\sqrt{\frac{2\cdot k_{\mathrm{He}}}{k_{\mathrm{He}}+1}} = \sqrt{1,248} = 1,117 \qquad \sqrt{R_{\mathrm{He}}} = \sqrt{2079} = 45,596 \;\left[\left(\mathrm{J}/\left(\mathrm{kg}\cdot\mathrm{K}\right)\right)^{1/2}\right]$$

$$\sqrt{T_{0,\mathrm{Ni}}} = \sqrt{293,16} = 17,122$$

În final, relațiile din alcătuirea grupurilor de ecuații (8.3), (8.6) și (8.10), corespunzătoare liniei heliului, se scriu în formă simplificată astfel:

$$A_{1,\mathrm{He}} = \frac{Q_{\mathrm{m,He}}^{\mathrm{inj}}\cdot 45,596\cdot 17,122}{0,649\cdot 1,117\cdot p_{0,\mathrm{He}}\cdot 10^5} = \frac{1076,919}{10^5}\cdot\frac{Q_{\mathrm{m,He}}^{\mathrm{inj}}}{p_{0,\mathrm{He}}} \tag{8.49}$$

$$Q_{\mathrm{m,He}}^{\mathrm{inj}} = \frac{A_{1,\mathrm{He}}\cdot 0,649\cdot 1,117\cdot p_{0,\mathrm{He}}\cdot 10^5}{45,596\cdot 17,122} = 92,857\cdot A_{1,\mathrm{He}}\cdot p_{0,\mathrm{He}} \tag{8.50}$$

$$p_{0,\mathrm{He}} = \frac{Q_{\mathrm{m,He}}^{\mathrm{inj}}\cdot 45,596\cdot 17,122}{10^5\cdot A_{1,\mathrm{He}}\cdot 0,649\cdot 1,117} = \frac{1076,919}{10^5}\cdot\frac{Q_{\mathrm{m,He}}^{\mathrm{inj}}}{A_{1,\mathrm{He}}} \tag{8.51}$$

unde: $A_{1,\mathrm{He}}\left[\mathrm{m}^2\right]$, $Q_{\mathrm{m,He}}^{\mathrm{inj}}\left[\mathrm{kg/s}\right]$, $T_0\left[K\right]$ iar $p_{0,\mathrm{He}}\left[\mathrm{bara}\right]$.

Dar, pentru aria colului ajutajului de injecție a heliului se poate scrie relația:

$$A_{1,\mathrm{He}} = 7,854\cdot 10^{-7}\cdot D_{1,\mathrm{He}}^2 \tag{8.52}$$

unde, introducând $D_{1,\mathrm{He}}\left[\mathrm{mm}\right]$ rezultă $A_{1,\mathrm{He}}\left[\mathrm{m}^2\right]$.

8.4 PRELUCRAREA DATELOR REZULTATE DIN TESTELE EFECTUATE PE INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ

Pentru cazul studiat, în care s-a considerat $\theta_{e,Ox} = 20^{o}C$, $\theta_{e,Ni} = 20^{o}C$, $\theta_{e,He} = 20^{o}C$, $p_{e,Ox} = 1{,}013$ bara, $p_{e,Ni} = 1{,}013$ bara, $\rho_{Ox} = 1{,}42\left[\mathrm{kg/m^3}\right]$, $\rho_{Ni} = 1{,}25\left[\mathrm{kg/m^3}\right]$, și $\rho_{He} = 0{,}18\left[\mathrm{kg/m^3}\right]$ rezultă valorile de lucru ale coeficienților de corecție:

$$F_{Ox} = \left(\frac{273{,}16}{20+273{,}16}\right)^{0{,}5}\cdot\left(\frac{1{,}013}{1{,}013}\right)^{0{,}5}\cdot\left(\frac{1{,}292}{1{,}42}\right)^{0{,}5} = 0{,}920$$

$$F_{Ni} = 0{,}965\cdot 1\cdot\left(\frac{1{,}292}{1{,}25}\right)^{0{,}5} = 0{,}981 \qquad (8.53)$$

$$F_{He} = 0{,}965\cdot 1\cdot\left(\frac{1{,}292}{0{,}18}\right)^{0{,}5} = 2{,}585$$

8.4.1 Calculul debitelor masice și volumice injectate și a diametrelor ajutajelor de injecție masică pe baza citirilor la rotametru pentru testele de preparare a amestecurilor NITROX, HELIOX și TRIMIX

După citirea de la cele trei rotametre ale fiecăreia dintre valorile debitelor, Q_{Ox}^{cit}, Q_{Ni}^{cit}, Q_{He}^{cit}, se determină, expresiile ce formează grupul de relații matematice (8.54), care sunt prezentate în continuare, pentru debitele masice injectate pe cele trei linii $Q_{m,Ox}^{inj}$, $Q_{m,Ni}^{inj}$ și $Q_{m,He}^{inj}$.

$$Q_{m,Ox}^{inj} = \frac{Q_{Ox}^{cit}\cdot 0{,}920}{260\cdot 175896} = \frac{Q_{Ox}^{cit}}{49709739}$$

unde, înlocuind: Q_{Ox}^{cit} $\left[\mathrm{cm_N^3/min}\right]$ se obține $Q_{m,Ox}^{inj}\left[\mathrm{kg/s}\right]$

sau:

$$Q_{m,Ox}^{inj} = \frac{Q_{Ox}^{cit}\cdot 1000}{49709739}$$

unde, înlocuind: Q_{Ox}^{cit} $\left[\mathrm{l_N/min}\right]$ se obține $Q_{m,Ox}^{inj}\left[\mathrm{kg/s}\right]$,

sau:

$$Q_{m,Ox}^{inj} = \frac{Q_{Ox}^{cit} \cdot 1000 \cdot 1000}{49709739} = \frac{Q_{Ox}^{cit}}{49,71} \quad (8.54)$$

unde, pentru: Q_{Ox}^{cit} $[l_N/\min]$ se obține $Q_{m,Ox}^{inj}[g/s]$.

$$Q_{m,Ni}^{inj} = \frac{Q_{Ni}^{cit} \cdot 0,981 \cdot 10^6}{297 \cdot 175896} = \frac{Q_{Ni}^{cit}}{53,252} \quad (8.55)$$

unde, pentru: Q_{Ni}^{cit} $[l_N/\min]$ se obține $Q_{m,Ni}^{inj}[g/s]$.

$$Q_{m,He}^{inj} = \frac{Q_{He}^{cit} \cdot 2,585 \cdot 10^6}{2097 \cdot 175896} = \frac{Q_{He}^{cit}}{141,465} \quad (8.56)$$

unde, pentru: Q_{He}^{cit} $[l_N/\min]$ se obține $Q_{m,He}^{inj}[g/s]$.

În continuare, pentru linia de oxigen, se determină lui $D_{1,Ox}$, $Q_{m,Ox}^{inj}$ și $p_{0,Ox}$ cu relațiile prezentate în continuare.

$$A_{1,Ox} = \frac{404,845}{10^5} \cdot \frac{Q_{m,Ox}^{inj}}{p_{0,Ox}}$$

sau:

$$7,854 \cdot 10^{-7} \cdot D_{1,Ox}^2 = \frac{404,845}{10^5} \cdot \frac{Q_{m,Ox}^{inj}}{p_{0,Ox}}$$

de unde rezultă:

$$D_{1,Ox} = 71,795 \cdot \sqrt{\frac{Q_{m,Ox}^{inj}}{p_{0,Ox}}} \quad (8.57)$$

unde, înlocuind: $Q_{m,Ox}^{inj}$ $[kg/s]$ și $p_{0,Ox}[bara]$, rezultă $D_{1,Ox}[mm]$.

$$Q_{m,Ox}^{inj} = 247,00 \cdot 7,854 \cdot 10^{-7} \cdot D_{1,Ox}^2 \cdot p_{0,Ox}$$

adică

$$Q_{m,Ox}^{inj} = 1,940 \cdot 10^{-4} \cdot D_{1,Ox}^2 \cdot p_{0,Ox} \quad (8.58)$$

unde, înlocuind $D_{1,Ox}[mm]$ și $p_{0,Ox}[bara]$, rezultă $Q_{m,Ox}^{inj}$ $[kg/s]$.

$$p_{0,\mathrm{Ox}} = \frac{404,845}{10^5} \cdot \frac{Q_{\mathrm{m,Ox}}^{\mathrm{inj}}}{7,854 \cdot 10^{-7} \cdot D_{1,\mathrm{Ox}}^2}$$

de unde rezultă

$$p_{0,\mathrm{Ox}} = 5154,63 \cdot \frac{Q_{\mathrm{m,Ox}}^{\mathrm{inj}}}{D_{1,\mathrm{Ox}}^2}$$

unde, înlocuind $Q_{\mathrm{m,Ox}}^{\mathrm{inj}}\ [\mathrm{kg}/s]$ și $D_{1,\mathrm{Ox}}[\mathrm{mm}]$ rezultă $p_{0,\mathrm{Ox}}[\mathrm{bara}]$.

Lucrând cu debitul $Q_{\mathrm{m,Ox}}^{\mathrm{inj}}[\mathrm{g/s}]$, $D_{1,\mathrm{Ox}}[\mathrm{mm}]$ și $p_{0,\mathrm{Ox}}[\mathrm{bara}]$, rezultă următoarele expresii:

$$D_{1,\mathrm{Ox}} = \frac{71,795}{\sqrt{1000}} \cdot \sqrt{\frac{Q_{\mathrm{m,Ox}}^{\mathrm{inj}}}{p_{0,\mathrm{Ox}}}} \quad \text{sau} \quad D_{1,\mathrm{Ox}} = 2,270 \cdot \sqrt{\frac{Q_{\mathrm{m,Ox}}^{\mathrm{inj}}}{p_{0,\mathrm{Ox}}}} \qquad (8.59)$$

$$Q_{\mathrm{m,Ox}}^{\mathrm{inj}} = 0,1940 \cdot D_{1,\mathrm{Ox}}^2 \cdot p_{0,\mathrm{Ox}} \qquad (8.60)$$

$$p_{0,\mathrm{Ox}} = 5,15463 \cdot \frac{Q_{\mathrm{m,Ox}}^{\mathrm{inj}}}{D_{1,\mathrm{Ox}}^2} \qquad (8.61)$$

Pentru linia de azot, se determină expresiile lui $D_{1,\mathrm{Ni}}$, $Q_{\mathrm{m,Ni}}^{\mathrm{inj}}$, și $p_{0,\mathrm{Ni}}$ cu relațiile prezentate în continuare.

$$A_{1,\mathrm{Ni}} = \frac{430,925}{10^5} \cdot \frac{Q_{\mathrm{m,Ni}}^{\mathrm{inj}}}{p_{0,\mathrm{Ni}}}$$

sau:

$$7,854 \cdot 10^{-7} \cdot D_{1,\mathrm{Ni}}^2 = \frac{430,925}{10^5} \cdot \frac{Q_{\mathrm{m,Ni}}^{\mathrm{inj}}}{p_{0,\mathrm{Ni}}}$$

de unde rezultă:

$$D_{1,\mathrm{Ni}} = 74,072 \cdot \sqrt{\frac{Q_{\mathrm{m,Ni}}^{\mathrm{inj}}}{p_{0,\mathrm{Ni}}}}$$

unde, înlocuind: $Q_{\mathrm{m,Ni}}^{\mathrm{inj}}\ [\mathrm{kg/s}]$ și $p_{0,\mathrm{Ni}}[\mathrm{bara}]$, rezultă $D_{1,\mathrm{Ni}}[\mathrm{mm}]$.

$$Q_{\mathrm{m,Ni}}^{\mathrm{inj}} = 232,058 \cdot 7,854 \cdot 10^{-7} \cdot D_{1,\mathrm{Ni}}^2 \cdot p_{0,\mathrm{Ni}} \qquad (8.62)$$

adică

$$Q^{\text{inj}}_{\text{m,Ni}} = 1{,}822 \cdot 10^{-4} \cdot D^2_{\text{1,Ni}} \cdot p_{\text{0,Ni}}$$

unde, înlocuind $D_{\text{1,Ni}}[\text{mm}]$ și $p_{\text{0,Ni}}[\text{bara}]$, rezultă. $Q^{\text{inj}}_{\text{m,Ni}}\ [\text{kg}/s]$.

$$p_{\text{0,Ni}} = \frac{430{,}925}{10^5} \cdot \frac{Q^{\text{inj}}_{\text{m,Ni}}}{7{,}854 \cdot 10^{-7}\, D^2_{\text{1,Ni}}}$$

de unde rezultă

$$p_{\text{0,Ni}} = 5486{,}69 \cdot \frac{Q^{\text{inj}}_{\text{m,Ni}}}{D^2_{\text{1,Ni}}} \qquad (8.63)$$

unde, înlocuind $Q^{\text{inj}}_{\text{m,Ni}}\ [\text{kg/s}]$ și $D_{\text{1,Ni}}[\text{mm}]$, rezultă $p_{\text{0,Ni}}[\text{bara}]$.

Lucrând cu debitul $Q^{\text{inj}}_{\text{m,Ni}}[\text{g/s}]$, $D_{\text{1,Ni}}[\text{mm}]$ și $p_{\text{0,Ni}}[\text{bara}]$, rezultă următoarele expresii:

$$D_{\text{1,Ni}} = \frac{74{,}072}{\sqrt{1000}} \cdot \sqrt{\frac{Q^{\text{inj}}_{\text{m,Ni}}}{p_{\text{0,Ni}}}} \quad \text{sau} \quad D_{\text{1,Ni}} = 2{,}342 \cdot \sqrt{\frac{Q^{\text{inj}}_{\text{m,Ni}}}{p_{\text{0,Ni}}}} \qquad (8.64)$$

$$Q^{\text{inj}}_{\text{m,Ni}} = 0{,}1822 \cdot D^2_{\text{1,Ni}} \cdot p_{\text{0,Ni}} \qquad (8.65)$$

$$p_{\text{0,Ni}} = 5{,}48669 \cdot \frac{Q^{\text{inj}}_{\text{m,Ni}}}{D^2_{\text{1,Ni}}} \qquad (8.66)$$

În mod similar liniei oxigenului și liniei azotului, pentru linia corespunzătoare heliului, expresiile mărimilor $D_{\text{1,He}}$, $Q^{\text{inj}}_{\text{m,He}}$, și $p_{\text{0,He}}$ se stabilesc folosind relațiile prezentate în continuare.

$$A_{\text{1,He}} = \frac{1076{,}919}{10^5} \cdot \frac{Q^{\text{inj}}_{\text{m,He}}}{p_{\text{0,He}}} \quad \text{sau} \quad 7{,}854 \cdot 10^{-7} \cdot D^2_{\text{1,He}} = \frac{1076{,}919}{10^5} \cdot \frac{Q^{\text{inj}}_{\text{m,He}}}{p_{\text{0,He}}}$$

de unde rezultă

$$D_{\text{1,He}} = 117{,}097 \cdot \sqrt{\frac{Q^{\text{inj}}_{\text{m,He}}}{p_{\text{0,He}}}}$$

unde, înlocuind $Q^{\text{inj}}_{\text{m,He}}\ [\text{kg/s}]$ și $p_{\text{0,He}}[\text{bara}]$, rezultă $D_{\text{1,He}}[\text{mm}]$.

$$Q^{\text{inj}}_{\text{m,He}} = 92{,}857 \cdot 7{,}854 \cdot 10^{-7} \cdot D^2_{\text{1,He}} \cdot p_{\text{0,He}}$$

adică

$$Q_{\mathrm{m,He}}^{\mathrm{inj}} = 0,7293 \cdot 10^{-4} \cdot D_{\mathrm{1,He}}^{2} \cdot p_{\mathrm{0,He}} \qquad (8.67)$$

unde, înlocuind $D_{\mathrm{1,He}}[\mathrm{mm}]$ și $p_{\mathrm{0,He}}[\mathrm{bara}]$, rezultă. $Q_{\mathrm{m,He}}^{\mathrm{inj}}\ [\mathrm{kg}/s]$.

$$p_{\mathrm{0,He}} = \frac{1076,919}{10^{5}} \cdot \frac{Q_{\mathrm{m,He}}^{\mathrm{inj}}}{7,854 \cdot 10^{-7} D_{\mathrm{1,He}}^{2}}$$

de unde rezultă

$$p_{\mathrm{0,Ni}} = 13711,73 \cdot \frac{Q_{\mathrm{m,He}}^{\mathrm{inj}}}{D_{\mathrm{1,He}}^{2}}$$

unde, înlocuind $Q_{\mathrm{m,He}}^{\mathrm{inj}}\ [\mathrm{kg/s}]$ și $D_{\mathrm{1,He}}[\mathrm{mm}]$, rezultă $p_{\mathrm{0,He}}[\mathrm{bara}]$.

Lucrând cu debitul $Q_{\mathrm{m,He}}^{\mathrm{inj}}[\mathrm{g/s}]$, $D_{\mathrm{1,He}}[\mathrm{mm}]$ și $p_{\mathrm{0,He}}[\mathrm{bara}]$, rezultă următoarele expresii:

$$D_{\mathrm{1,He}} = \frac{117,097}{\sqrt{1000}} \cdot \sqrt{\frac{Q_{\mathrm{m,He}}^{\mathrm{inj}}}{p_{\mathrm{0,He}}}},\ \text{sau}\ D_{\mathrm{1,He}} = 3,703 \cdot \sqrt{\frac{Q_{\mathrm{m,He}}^{\mathrm{inj}}}{p_{\mathrm{0,He}}}} \qquad (8.68)$$

$$Q_{\mathrm{m,He}}^{\mathrm{inj}} = 0,07293 \cdot D_{\mathrm{1,He}}^{2} \cdot p_{\mathrm{0,He}} \qquad (8.69)$$

$$p_{\mathrm{0,He}} = 13,71173 \cdot \frac{Q_{\mathrm{m,He}}^{\mathrm{inj}}}{D_{\mathrm{1,He}}^{2}} \qquad (8.70)$$

Prin urmare, relațiile ce alcătuiesc grupurile (8.3), (8.6) și (8.10) se transformă, rezultând următoarele expresii matematice:

$$D_{\mathrm{1,Ox}} = 2,270 \cdot \sqrt{\frac{Q_{\mathrm{m,Ox}}^{\mathrm{inj}}}{p_{\mathrm{0,Ox}}}} \qquad D_{\mathrm{1,Ni}} = 2,342 \cdot \sqrt{\frac{Q_{\mathrm{m,Ni}}^{\mathrm{inj}}}{p_{\mathrm{0,Ni}}}} \qquad D_{\mathrm{1,He}} = 3,703 \cdot \sqrt{\frac{Q_{\mathrm{m,He}}^{\mathrm{inj}}}{p_{\mathrm{0,He}}}} \qquad (8.71)$$

$$Q_{\mathrm{m,Ox}}^{\mathrm{inj}} = 0,1940 \cdot D_{\mathrm{1,Ox}}^{2} \cdot p_{\mathrm{0,Ox}} \qquad Q_{\mathrm{m,Ni}}^{\mathrm{inj}} = 0,1822 \cdot D_{\mathrm{1,Ni}}^{2} \cdot p_{\mathrm{0,Ni}} \qquad Q_{\mathrm{m,He}}^{\mathrm{inj}} = 0,07293 \cdot D_{\mathrm{1,He}}^{2} \cdot p_{\mathrm{0,He}} \qquad (8.72)$$

$$p_{\mathrm{0,Ox}} = 5,15463 \cdot \frac{Q_{\mathrm{m,Ox}}^{\mathrm{inj}}}{D_{\mathrm{1,Ox}}^{2}}; \qquad p_{\mathrm{0,Ni}} = 5,48669 \cdot \frac{Q_{\mathrm{m,Ni}}^{\mathrm{inj}}}{D_{\mathrm{1,Ni}}^{2}}; \qquad p_{\mathrm{0,He}} = 13,71173 \cdot \frac{Q_{\mathrm{m,He}}^{\mathrm{inj}}}{D_{\mathrm{1,He}}^{2}} \qquad (8.73)$$

Utilizând relațiile de calcul a debitelor masice injectate pe cele trei linii funcție de citirile la rotametre,

Tabelul 8.4 *Amestecuri NITROX*. Determinarea debitelor masice de oxigen și de azot injectate ($Q^{inj}_{m,Ox}$, $Q^{inj}_{m,Ni}$) pe baza măsurătorilor cu rotametrele și a diametrelor ajutajelor de injecție de pe liniile de oxigen – Ox și azot – Ni ($D_{1,Ox}$, $D_{1,Ni}$)

Cod test	Manometru Ox (OM 4)		Rotametru Ox (ORt)			Diametru OBi	Manometru Ni (NM 4)		Rotametru Ni (NRt)			Diametru NBi
	$p_{0,Ox}$	$p_{0,Ox}$	$Q_{Ox,mm}$	Q^{cit}_{Ox}	$Q^{inj}_{m,Ox}$	$D_{1,Ox}$	$p_{0,Ni}$	$p_{0,Ni}$	$Q_{Ni,mm}$	Q^{cit}_{Ni}	$Q^{inj}_{m,Ni}$	$D_{1,Ni}$
	[barm]	[bara]	[mm]	[l$_N$/min]	[g/s]	[mm]	[barm]	[bara]	[mm]	[l$_N$/min]	[g/s]	[mm]
1 NiOx	4,8	5,8	33	9,53	0,192	0,413	8,6	9,6	62	16,7	0,313	0,423
2 NiOx	4,8	5,8	33	9,53	0,192	0,413	7,6	8,6	54	14,9	0,279	0,421
3 NiOx	4,5	5,5	30	8,73	0,176	0,406	6,0	7,0	44	12,4	0,232	0,426
4 NiOx	4,6	5,6	31	9,00	0,181	0,408	6,5	7,5	47	13,1	0,246	0,424
5 NiOx	4,8	5,8	33	9,53	0,192	0,413	5,2	6,2	38	10,8	0,203	0,423
6 NiOx	4,8	5,8	33	9,53	0,192	0,413	4,6	5,6	35	10,1	0,189	0,430
7 NiOx	4,6	5,6	33	9,53	0,192	0,413	3,7	4,7	29	8,46	0,159	0,430
8 NiOx	4,8	5,8	33	9,53	0,192	0,413	2,9	3,9	24	7,11	0,133	0,432

Tabelul 8.5 *Amestecuri HELIOX*. Determinarea debitelor masice de oxigen și de heliu injectate ($Q^{inj}_{m,Ox}$, $Q^{inj}_{m,He}$) pe baza măsurătorilor cu rotametrele și a diametrelor ajutajelor de injecție de pe liniile de oxigen – Ox și heliu – He ($D_{1,Ox}$, $D_{1,He}$)

Cod test	Manometru Ox (OM 4)		Rotametru Ox (ORt)			Diametru OBi	Manometru He (HM 4)		Rotametru He (HRt)			Diametru HBi
	$p_{0,Ox}$	$p_{0,Ox}$	$Q_{Ox,mm}$	Q^{cit}_{Ox}	$Q^{inj}_{m,Ox}$	$D_{1,Ox}$	$p_{0,He}$	$p_{0,He}$	$Q_{He,mm}$	Q^{cit}_{He}	$Q^{inj}_{m,He}$	$D_{1,He}$
	[barm]	[bara]	[mm]	[l$_N$/min]	[g/s]	[mm]	[barm]	[bara]	[mm]	[l$_N$/min]	[g/s]	[mm]
1 HeOx	4,8	5,8	33	9,53	0,192	0,413	6,7	7,7	65	17,3	0,122	0,466
2 HeOx	4,8	5,8	33	9,53	0,192	0,413	5,8	6,8	52,5	14,5	0,102	0,453
3 HeOx	4,8	5,8	33	9,53	0,192	0,413	4,8	5,8	46	12,9	0,091	0,463
4 HeOx	4,8	5,8	33	9,53	0,192	0,413	3,9	4,9	38	10,8	0,076	0,461
5 HeOx	4,8	5,8	33	9,53	0,192	0,413	2,9	3,9	31	9,0	0,063	0,470
6 HeOx	4,8	5,8	33	9,53	0,192	0,413	2,4	3,4	28	8,2	0,058	0,483
7 HeOx	4,8	5,8	33	9,53	0,192	0,413	1,9	2,9	24	7,11	0,050	0,486

$$Q_{\mathrm{m,Ox}}^{\mathrm{inj}} = \frac{Q_{\mathrm{Ox}}^{\mathrm{cit}}}{49,71} \qquad Q_{\mathrm{m,Ni}}^{\mathrm{inj}} = \frac{Q_{\mathrm{Ni}}^{\mathrm{cit}}}{53,252} \qquad Q_{\mathrm{m,He}}^{\mathrm{inj}} = \frac{Q_{\mathrm{He}}^{\mathrm{cit}}}{141,465} \qquad \text{(v. rel. 8.54, 8.55, 8.56)}$$

și relațiile

$$Q_{\mathrm{m,Ox}}^{\mathrm{inj}} = 0,1940 \cdot D_{1,\mathrm{Ox}}^{2} \cdot p_{0,\mathrm{Ox}};\; Q_{\mathrm{m,Ni}}^{\mathrm{inj}} = 0,1822 \cdot D_{1,\mathrm{Ni}}^{2} \cdot p_{0,\mathrm{Ni}};\; Q_{\mathrm{m,He}}^{\mathrm{inj}} = 0,07293 \cdot D_{1,\mathrm{He}}^{2} \cdot p_{0,\mathrm{He}}. \quad (8.74)$$

se calculează debitele masice, pe cele trei linii, determinate funcție de citirile la rotametre $\left(Q_{\mathrm{m,gaz}}^{\mathrm{inj}}\right)$ și diametrele ajutajelor de injecție masică $\left(D_{1,\mathrm{gaz}}\right)$.

Calculele și valorile obținute pentru o serie de teste experimentale, sunt prezentate sintetic în tabelul 8.4 pentru NITROX, în tabelul 8.5 pentru HELIOX și în tabelul 8.6 pentru TRIMIX.

Valorile diametrelor ajutajelor de injecție masică corespunzătoare fiecărei linii au fost obținute prin mediere. Astfel, au rezultat:

- pentru ajutajul de injecție masică de pe linia de oxigen $D_{1,\mathrm{Ox}} = 0,411$ mm
- pentru ajutajul de injecție masică de pe linia de azot D1,Ni=0,422mm $D_{1,\mathrm{Ni}} = 0,422$ mm
- pentru ajutajul de injecție masică de pe linia de heliu D1,He=0,465mm $D_{1,\mathrm{He}} = 0,465$ mm

8.4.2 Determinarea debitelor masice injectate prin calculul termodinamic al ajutajelor de injecție lucrând în regim critic, pentru amestecurile NITROX, HELIOX și TRIMIX și compararea cu debitele obținute cu rotametrele

Cu diametrele determinate anterior și utilizând relațiile (8.74), s-au calculat debitele masice injectate prin ajutajele de injecție masică lucrând în regim critic ($Q_{\mathrm{m,am}}^{\mathrm{inj}}$), pentru testele experimentale efectuate, pentru amestecurile NITROX (tabelul 8.7), pentru amestecurile HELIOX (tabelul 8.8) și pentru amestecul TRIMIX (tabelul 8.9).

Comparând debitele masice de injecție determinate prin calculul ajutajelor de injecție masică cu debitele masice de injecție determinate prin citirea la rotametre, se observă o apropiere foarte bună, până la identificare, pentru liniile de oxigen și azot și o apropiere bună sau mai puțin bună pentru linia de heliu.

8.4.3 Calculul debitului de amestec injectat și calculul participațiilor masice și volumice ale amestecului, pentru amestecurile NITROX, HELIOX și TRIMIX și comparare cu participațiile volumice determinate prin analiza gazelor

În continuare, s-a efectuat determinarea caracteristicilor amestecurilor binare și ternare de gaze utilizând relațiile (8.16) - (8.35) și anume relațiile (8.16)

- (8.21) pentru amestecul NITROX, relațiile (8.22) - (8.27) pentru amestecul HELIOX și relațiile (8.28) - (8.35) pentru amestecul TRIMIX. Se obțin participațiile masice ale componentelor amestecurilor de gaze testate pe instalația experimentală și apoi participațiile volumice ale gazelor ce compun amestecurile de gaze.

Tabelul 8.6 *Amestecuri TRIMIX*. Determinarea debitelor masice de oxigen, azot și heliu injectate ($Q_{m,Ox}^{inj}$, $Q_{m,Ni}^{inj}$, și $Q_{m,He}^{inj}$) pe baza măsurătorilor cu rotametrele și a diametrelor ajutajelor de injecție de pe liniile de oxigen – Ox, azot – Ni și heliu – He ($D_{1,Ox}$, $D_{1,Ni}$ și $D_{1,He}$)

Cod test	**Manometru Ox (OM 4)**		**Rotametru Ox (ORt)**			**Diametr OBi**
	$p_{0,Ox}$	$p_{0,Ox}$	$Q_{Ox,mm}$	Q_{Ox}^{cit}	$Q_{m,Ox}^{inj}$	$D_{1,Ox}$
	[barm]	[bara]	[mm]	[lN/min]	[g/s]	[mm]
1 TRI	2,9	3,9	23	6,83	0,128	0,411
2 TRI	3,9	4,9	27	7,92	0,159	0,409
3 TRI	4,9	5,9	33	9,53	0,191	0,408
4 TRI	5,6	6,6	37	10,6	0,213	0,407
5 TRI	6,8	7,8	43	12,1	0,243	0,400

Cod test	**Manometru Ni (NM 4)**		**Rotametru Ni (NRt)**			**Diametr NBi**
	$p_{0,Ni}$	$p_{0,Ni}$	$Q_{Ni,mm}$	Q_{Ni}^{cit}	$Q_{m,Ni}^{inj}$	$D_{1,Ni}$
	[barm]	[bara]	[mm]	[lN/min]	[g/s]	[mm]
1 TRI	3,9	4,9	28	8,20	0,154	0,415
2 TRI	3,9	4,9	28	8,20	0,154	0,415
3 TRI	3,9	4,9	28	8,20	0,154	0,415
4 TRI	3,9	4,9	28	8,20	0,154	0,415
5 TRI	3,9	4,9	28	8,20	0,154	0,415

Cod test	**Manometru He (HM 4)**		**Rotametru He (HRt)**			**Diametr HBi**
	$p_{0,He}$	$p_{0,He}$	$Q_{He,mm}$	Q_{He}^{cit}	$Q_{m,He}^{inj}$	$D_{1,He}$
	[barm]	[bara]	[mm]	[lN/min]	[g/s]	[mm]
1 TRI	3,9	4,9	37	10,6	0,075	0,458
2 TRI	3,9	4,9	38	10,8	0,076	0,461
3 TRI	3,9	4,9	38	10,8	0,076	0,461
4 TRI	3,9	4,9	38	10,8	0,076	0,461
5 TRI	3,9	4,9	37	10,6	0,075	0,458

Tabelul 8.7 *Amestecuri NITROX*. Debitele masice de oxigen injectate și debitele masice de azot injectate ($Q^{inj}_{m,Ox}$, $Q^{inj}_{m,Ni}$). Comparație între debitele determinate cu rotametrele și debitele calculate

Cod test	Manometru Ox (OM 4)	Diametrul mediu OBi	Debit calculat prin ajutajul OBi	Debit măsurat cu rotametrul (ORt)	Manometru Ni (NM 4)	Diametrul mediu NBi	Debit calculat prin ajutajul NBi	Debit măsurat cu rotametrul (NRt)
	$p_{0,Ox}$	$D_{1,Ox}$	$Q^{inj}_{m,Ox}$	$Q^{inj}_{m,Ox}$	$p_{0,Ni}$	$D_{1,Ni}$	$Q^{inj}_{m,Ni}$	$Q^{inj}_{m,Ni}$
	[bara]	[mm]	[g/s]	[g/s]	[bara]	[mm]	[g/s]	[g/s]
1 NiOx	5,8	0,411	0,190	0,192	9,6	0,422	0,311	0,313
2 NiOx	5,8	0,411	0,190	0,192	8,6	0,422	0,279	0,279
3 NiOx	5,5	0,411	0,180	0,176	7,0	0,422	0,227	0,232
4 NiOx	5,6	0,411	0,183	0,181	7,5	0,422	0,243	0,246
5 NiOx	5,8	0,411	0,190	0,192	6,2	0,422	0,201	0,203
6 NiOx	5,8	0,411	0,190	0,192	5,6	0,422	0,182	0,189
7 NiOx	5,6	0,411	0,190	0,192	4,7	0,422	0,153	0,159
8 NiOx	5,8	0,411	0,190	0,192	3,9	0,422	0,127	0,133

Tabelul 8.8 *Amestecuri HELIOX*. Debitele masice de oxigen injectate și debitele masice de heliu injectate ($Q^{inj}_{m,Ox}$, $Q^{inj}_{m,He}$). Comparație între debitele determinate cu rotametrele și debitele calculate

Cod test	Manometru Ox (OM 4)	Diametrul mediu OBi	Debit calculat prin ajutajul OBi	Debit măsurat cu rotametrul (ORt)	Manometru He (HM 4)	Diametrul mediu HBi	Debit calculat prin ajutajul HBi	Debit măsurat cu rotametrul (HRt)
	$p_{0,Ox}$	$D_{1,Ox}$	$Q^{inj}_{m,Ox}$	$Q^{inj}_{m,Ox}$	$p_{0,He}$	$D_{1,He}$	$Q^{inj}_{m,He}$	$Q^{inj}_{m,He}$
	[bara]	[mm]	[g/s]	[g/s]	[bara]	[mm]	[g/s]	[g/s]
1 HeOx	5,8	0,411	0,190	0,192	7,7	0,465	0,121	0,122
2 HeOx	5,8	0,411	0,190	0,192	6,8	0,465	0,107	0,102
3 HeOx	5,8	0,411	0,190	0,192	5,8	0,465	0,091	0,091
4 HeOx	5,8	0,411	0,190	0,192	4,9	0,465	0,077	0,076
5 HeOx	5,8	0,411	0,190	0,192	3,9	0,465	0,062	0,063
6 HeOx	5,8	0,411	0,190	0,192	3,4	0,465	0,054	0,058
7 HeOx	5,8	0,411	0,190	0,192	2,9	0,465	0,046	0,050

Tabelul 8.9 Amestecuri TRIMIX. Debitele masice de oxigen injectate, debitele masice de azot injectate și debitele masice de heliu injectate ($Q_{m,Ox}^{inj}$, $Q_{m,Ni}^{inj}$, $Q_{m,He}^{inj}$). Comparație între debitele determinate cu rotametrele și debitele calculate

Cod test	Manometru Ox (OM 4)	Diametrul mediu OBi	Debit calculat prin ajutajul OBi	Debit măsurat cu rotametrul (ORt)
	$p_{0,Ox}$	$D_{1,Ox}$	$Q_{m,Ox}^{inj}$	$Q_{m,Ox}^{inj}$
	[bara]	[mm]	[g/s]	[g/s]
1 TRI	3,9	0,411	0,128	0,128
2 TRI	4,9	0,411	0,160	0,159
3 TRI	5,9	0,411	0,193	0,191
4 TRI	6,6	0,411	0,216	0,213
5 TRI	7,8	0,411	0,255	0,243

Cod test	Manometru Ni (NM 4)	Diametrul mediu NBi	Debit calculat prin ajutajul NBi	Debit măsurat cu rotametrul (NRt)
	$p_{0,Ni}$	$D_{1,Ni}$	$Q_{m,Ni}^{inj}$	$Q_{m,Ni}^{inj}$
	[bara]	[mm]	[g/s]	[g/s]
1 TRI	4,9	0,422	0,158	0,154
2 TRI	4,9	0,422	0,158	0,154
3 TRI	4,9	0,422	0,158	0,154
4 TRI	4,9	0,422	0,158	0,154
5 TRI	4,9	0,422	0,158	0,154

Cod test	Manometru He (HM 4)	Diametrul mediu HBi	Debit calculat prin ajutajul HBi	Debit măsurat cu rotametrul (HRt)
	$p_{0,He}$	$D_{1,He}$	$Q_{m,He}^{inj}$	$Q_{m,He}^{inj}$
	[bara]	[mm]	[g/s]	[g/s]
1 TRI	4,9	0,465	0,077	0,075
2 TRI	4,9	0,465	0,077	0,076
3 TRI	4,9	0,465	0,077	0,076
4 TRI	4,9	0,465	0,077	0,076
5 TRI	4,9	0,465	0,077	0,075

Valorile sunt trecute în tabelul 8.10 pentru amestecul NITROX și luând în considerare debitele masice injectate obținute din debitele masice injectate pe liniile de azot și oxigen determinate cu rotametrele, în tabelul 8.11 pentru NITROX cu debitele celor două componente determinate prin calculul ajutajelor lucrând în regim critic, în tabelul 8.12 pentru HELIOX cu debitele masice ale celor două componente determinate cu rotametrele și în tabelul 8.13 pentru

HELIOX cu debitele componentelor determinate prin calculul ajutajelor critice, și în tabelul 8.14 pentru TRIMIX cu debitele masice ale componentelor determinate cu rotametrele și în tabelul 8.15 pentru debitele celor trei componente determinate prin calculul ajutajelor critice (sonice).

Comparând, pentru fiecare test efectuat, valorile participațiilor volumice ale componentelor din amestecurile determinate prin măsurători de presiuni și debite cu valorile obținute în urma analizei oxigenului din amestec, cu analizor specializat, se pune în evidență o foarte bună apropiere a valorilor pentru amestecul NITROX și o apropiere bună pentru amestecurile HELIOX și TRIMIX.

8.5 REPREZENTAREA GRAFICĂ ȘI ANALIZA COMPARATIVĂ A REZULTATELOR OBȚINUTE ÎN CADRUL STUDIILOR EFECTUATE PRIVIND PREPARAREA ÎN FLUX CONTINUU A AMESTECURILOR NITROX, HELIOX ȘI TRIMIX

Valorile debitelor masice injectate de oxigen ($Q_{m,Ox}^{inj}$), de azot ($Q_{m,Ni}^{inj}$) și de heliu ($Q_{m,He}^{inj}$), participațiile masice de oxigen (m_{Ox}^{inj}), de azot (m_{Ni}^{inj}) și de heliu (m_{He}^{inj}) și participațiile volumice de oxigen (r_{Ox}^{inj}), de azot (r_{Ni}^{inj}) și de heliu (r_{He}^{inj}), obținute în urma studiilor ce au urmărit prepararea în flux continuu a amestecurilor respiratorii binare NITROX, HELIOX și ternare TRIMIX au fost transpuse sub formă grafică și sunt redate și analizate comparativ în paragrafele următoare.

Tabelul 8.10 *Amestecuri NITROX*. Calculul debitelor masice de NITROX injectate ($Q_{m,NiOx}^{inj}$), a participațiilor masice ale componentelor (m_{Ox}^{inj} și m_{Ni}^{inj}) și a participațiilor volumice ale componentelor (r_{Ox}^{inj} și r_{Ni}^{inj}), pe baza debitelor masice ale componentelor determinate cu rotametrele

Cod test	$Q_{m,Ox}^{inj}$	$Q_{m,Ni}^{inj}$	$Q_{m,NiOx}^{inj}$	m_{Ox}^{inj}	m_{Ni}^{inj}	R_{NiOx}^{inj}	r_{Ox}^{inj}	r_{Ni}^{inj}
	[g/s]	[g/s]	[g/s]	[-]	[-]	[J/(kg·K)]	[-]	[-]
1 NiOx	0,192	0,313	0,505	0,380	0,620	282,940	0,349	0,651
2 NiOx	0,192	0,279	0,471	0,408	0,592	281,904	0,376	0,624
3 NiOx	0,176	0,232	0,408	0,431	0,569	281,053	0,399	0,601
4 NiOx	0,181	0,246	0,427	0,424	0,576	281,312	0,392	0,608
5 NiOx	0,192	0,203	0,395	0,486	0,514	279,018	0,453	0,547
6 NiOx	0,192	0,189	0,381	0,504	0,496	278,352	0,471	0,529
7 NiOx	0,192	0,159	0,351	0,547	0,453	276,761	0,514	0,486
8 NiOx	0,192	0,133	0,325	0,591	0,409	275,133	0,558	0,442

Tabelul 8.11 Amestecuri NITROX. Calculul debitelor masice de NITROX injectate ($Q^{inj}_{m,NiOx}$), a participațiilor masice ale componentelor (m^{inj}_{Ox} și m^{inj}_{Ni}) și a participațiilor volumice ale componentelor (r^{inj}_{Ox} și r^{inj}_{Ni}), pe baza debitelor masice ale componentelor determinate prin calcul

Cod test	$Q^{inj}_{m,Ox}$	$Q^{inj}_{m,Ni}$	$Q^{inj}_{m,NiOx}$	m^{inj}_{Ox}	m^{inj}_{Ni}	R^{inj}_{NiOx}	r^{inj}_{Ox}	r^{inj}_{Ni}
	[g/s]	[g/s]	[g/s]	[-]	[-]	[J/(kg·K)]	[-]	[-]
1 NiOx	0,190	0,311	0,501	0,379	0,621	282,977	0,348	0,652
2 NiOx	0,190	0,279	0,469	0,405	0,595	282,015	0,373	0,627
3 NiOx	0,180	0,227	0,407	0,442	0,558	280,646	0,409	0,591
4 NiOx	0,183	0,243	0,426	0,429	0,571	281,127	0,397	0,603
5 NiOx	0,190	0,201	0,391	0,486	0,514	279,018	0,453	0,547
6 NiOx	0,190	0,182	0,372	0,511	0,489	278,093	0,478	0,522
7 NiOx	0,190	0,153	0,343	0,554	0,446	276,502	0,521	0,479
8 NiOx	0,190	0,127	0,317	0,599	0,401	274,837	0,567	0,433

Tabelul 8.12 Amestecuri HELIOX. Calculul debitelor masice de HELIOX injectate ($Q^{inj}_{m,HeOx}$), a participațiilor masice ale componentelor (m^{inj}_{Ox} și m^{inj}_{He}) și a participațiilor volumice ale componentelor (r^{inj}_{Ox} și r^{inj}_{He}), pe baza debitelor masice ale componentelor determinate cu rotametrele

Cod test	$Q^{inj}_{m,Ox}$	$Q^{inj}_{m,He}$	$Q^{inj}_{m,HeOx}$	m^{inj}_{Ox}	m^{inj}_{He}	R^{inj}_{HeOx}	r^{inj}_{Ox}	r^{inj}_{He}
	[g/s]	[g/s]	[g/s]	[-]	[-]	[J/(kg·K)]	[-]	[-]
1 HeOx	0,192	0,122	0,314	0,611	0,389	967,591	0,164	0,836
2 HeOx	0,192	0,102	0,294	0,653	0,347	591,193	0,191	0,809
3 HeOx	0,192	0,091	0,283	0,678	0,322	845,718	0,208	0,792
4 HeOx	0,192	0,076	0,268	0,716	0,284	776,596	0,240	0,760
5 HeOx	0,192	0,063	0,255	0,753	0,247	709,293	0,276	0,724
6 HeOx	0,192	0,058	0,250	0,768	0,232	682,008	0,293	0,707
7 HeOx	0,192	0,050	0,242	0,793	0,207	636,533	0,324	0,676

Tabelul 8.13 Amestecuri HELIOX. Calculul debitelor masice de HELIOX injectate ($Q^{inj}_{m,HeOx}$), a participațiilor masice ale componentelor (m^{inj}_{Ox} și m^{inj}_{He}) și a participațiilor volumice ale componentelor (r^{inj}_{Ox} și r^{inj}_{He}), pe baza debitelor masice ale componentelor determinate prin calcul

Cod test	$Q^{inj}_{m,Ox}$	$Q^{inj}_{m,He}$	$Q^{inj}_{m,HeOx}$	m^{inj}_{Ox}	m^{inj}_{He}	R^{inj}_{HeOx}	r^{inj}_{Ox}	r^{inj}_{He}
	[g/s]	[g/s]	[g/s]	[-]	[-]	[J/(kg·K)]	[-]	[-]
1 HeOx	0,190	0,121	0,311	0,611	0,389	967,591	0,164	0,836
2 HeOx	0,190	0,107	0,297	0,640	0,360	914,840	0,181	0,818
3 HeOx	0,190	0,091	0,281	0,676	0,324	849,356	0,207	0,793
4 HeOx	0,190	0,077	0,267	0,712	0,288	783,872	0,236	0,764
5 HeOx	0,190	0,062	0,252	0,754	0,246	707,474	0,277	0,723
6 HeOx	0,190	0,054	0,244	0,779	0,221	661,990	0,306	0,694
7 HeOx	0,190	0,046	0,236	0,805	0,195	614,705	0,340	0,660

Tabelul 8.14 Amestecuri TRIMIX. Calculul debitelor masice de TRIMIX injectate ($Q_{m,TRI}^{inj}$), a participațiilor masice ale componentelor (m_{Ox}^{inj}, m_{Ni}^{inj} și m_{He}^{inj}) și a participațiilor volumice ale componentelor (r_{Ox}^{inj}, r_{Ni}^{inj} și r_{He}^{inj}) pe baza debitelor masice ale componentelor determinate cu rotametrele

Cod test	$Q_{m,Ox}^{inj}$	$Q_{m,He}^{inj}$	$Q_{m,Ni}^{inj}$	$Q_{m,TRI}^{inj}$	m_{Ox}^{inj}	m_{He}^{inj}	m_{Ni}^{inj}	R_{TRI}^{inj}	r_{Ox}^{inj}	r_{He}^{inj}	r_{Ni}^{inj}
	[g/s]	[g/s]	[g/s]	[g/s]	[-]	[-]	[-]	[J/(kg·K)]	[-]	[-]	[-]
1 TRI	0,128	0,075	0,154	0,357	0,359	0,210	0,431	657,937	0,142	0,664	0,195
2 TRI	0,159	0,076	0,154	0,389	0,409	0,195	0,396	629,357	0,169	0,644	0,187
3 TRI	0,191	0,076	0,154	0,421	0,454	0,181	0,366	603,041	0,196	0,624	0,180
4 TRI	0,213	0,076	0,154	0,443	0,481	0,172	0,348	586,004	0,213	0,610	0,176
5 TRI	0,243	0,075	0,154	0,472	0,515	0,159	0,326	561,283	0,239	0,589	0,173

Tabelul 8.15 Amestecuri TRIMIX. Calculul debitelor masice de TRIMIX injectate ($Q_{m,TRI}^{inj}$), a participațiilor masice ale componentelor (m_{Ox}^{inj}, m_{Ni}^{inj} și m_{He}^{inj}) și a participațiilor volumice ale componentelor (r_{Ox}^{inj}, r_{Ni}^{inj} și r_{He}^{inj}) pe baza debitelor masice ale componentelor determinate prin calcul

Cod test	$Q_{m,Ox}^{inj}$	$Q_{m,He}^{inj}$	$Q_{m,Ni}^{inj}$	$Q_{m,TRI}^{inj}$	m_{Ox}^{inj}	m_{He}^{inj}	m_{Ni}^{inj}	R_{TRI}^{inj}	r_{Ox}^{inj}	r_{He}^{inj}	r_{Ni}^{inj}
	[g/s]	[g/s]	[g/s]	[g/s]	[-]	[-]	[-]	[J/(kg·K)]	[-]	[-]	[-]
1 TRI	0,128	0,077	0,158	0,363	0,35	0,21	0,43	655,30	0,139	0,666	0,195
2 TRI	0,160	0,077	0,158	0,395	0,41	0,19	0,40	620,41	0,172	0,637	0,191
3 TRI	0,193	0,077	0,158	0,428	0,45	0,18	0,37	601,11	0,195	0,623	0,182
4 TRI	0,216	0,077	0,158	0,451	0,48	0,17	0,35	582,18	0,214	0,607	0,179
5 TRI	0,255	0,077	0,158	0,490	0,52	0,16	0,32	562,88	0,240	0,591	0,169

8.5.1 Reprezentarea comparativă a valorilor obținute prin calcul și prin măsurători pentru debitul masic de oxigen ($Q_{m,Ox}^{inj}$) și debitul masic de azot ($Q_{m,Ni}^{inj}$), injectate pentru prepararea celor opt amestecuri respiratorii NITROX studiate

În figura 8.4 sunt prezentate, comparativ, valorile debitului masic de oxigen injectat ($Q_{m,Ox}^{inj}$), pentru cele opt tipuri de amestec NITROX, iar în figura 8.5, tot comparativ, valorile debitului masic de azot injectat ($Q_{m,Ni}^{inj}$), pentru aceleași opt tipuri de amestecuri NITROX. Un set de valori a fost obținut prin calcul, iar celălalt set de valori, prin citiri efectuate la rotametrele instalației experimentale pe parcursul procesului de preparare al amestecurilor respiratorii NITROX.

Din analiza graficului din figura 8.4, se remarcă faptul că pentru șapte din cele opt amestecuri NITROX studiate 1 NiOx, 2 NiOx, 3 NiOx, 4 NiOx, 5 NiOx, 6 NiOx, 7 NiOx și 8 NiOx, între valorile debitelor masice de oxigen injectat ($Q_{m,Ox}^{inj}$), valori obținute prin cele două metode de determinare, există diferențe de 2 mg/s, care, exprimat în procente reprezintă o diferență de circa 1 %, față de valoarea etalon, adică valoarea măsurată la rotametru. În cazul amestecului 3

NiOx diferența este mai mare și anume de 4 mg/s, ceea ce înseamnă exprimat procentual o diferență de 2,3 %.

În ceea privește debitul masic de azot injectat ($Q_{m,Ni}^{inj}$), din figura 8.5, diferențele dintre valorile obținute prin cele două metode sunt mai variate, și sunt cuprinse între 2 mg/s și 7 mg/s. Corespunzător fiecărui amestec preparat, aceste diferențe sunt de: 0,64 % pentru 1 NiOx, 2,16 % pentru 3 NiOx, 1,22% pentru 4 NiOx, 0,98 % pentru 5 NiOx, 3,70 % pentru 6 NiOx, 3,77 % pentru 7 NiOx și 4,51 % pentru 8 NiOx. În cazul amestecului 2 NiOx nu există diferențe, cele două valori rezultate fiind egale.

8.5.2 Reprezentarea comparativă a valorilor obținute prin calcul și prin măsurători pentru debitul masic de oxigen ($Q_{m,Ox}^{inj}$) și debitul masic de heliu ($Q_{m,He}^{inj}$), injectate pentru prepararea celor șapte amestecuri respiratorii HELIOX studiate

În figura 8.6 și în figura 8.7 sunt prezentate, grafic, valorile debitelor masice de oxigen injectate ($Q_{m,Ox}^{inj}$) în vederea preparării a șapte amestecuri HELIOX, valori ce au fost obținute prin calcul și respectiv prin citiri la rotametrele instalației experimentale.

Graficul din figura 8.6 ilustrează valorile debitului masic de oxigen injectat ($Q_{m,Ox}^{inj}$), valori obținute prin calcul și respectiv prin măsurătorile efectuate pe instalația experimentală. Prin compararea rezultatelor, se remarcă, pentru toate cele șapte amestecuri studiate, o aceeași diferență de 2 mg/s, care exprimată procentual, reprezintă, în toate cele șapte cazuri, o diferență de 1,04 %.

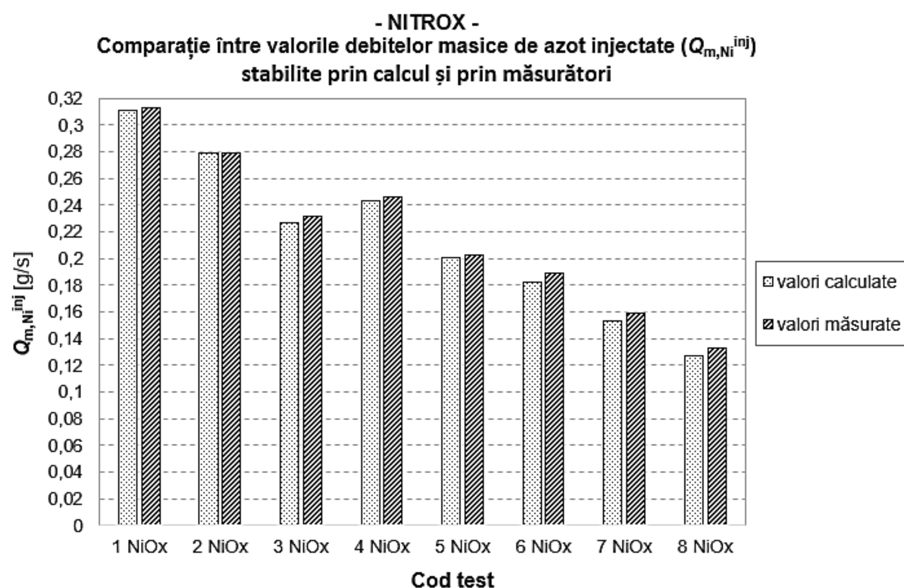


Figura 8.5 Reprezentare comparativă a valorilor debitelor masice de azot injectate ($Q_{m,Ni}^{inj}$) obținute prin calcul și prin măsurători, pentru cele opt amestecuri respiratorii NITROX

Valorile debitului masic de heliu injectat ($Q^{inj}_{m,He}$), transpuse grafic și prezentate în figura 8.7, relevă diferențe cuprinse între 1 mg/s și 5 mg/s. Excepție face amestecul 3 NiOx, pentru care s-au obținut, prin ambele metode de determinare, aceleași valori.

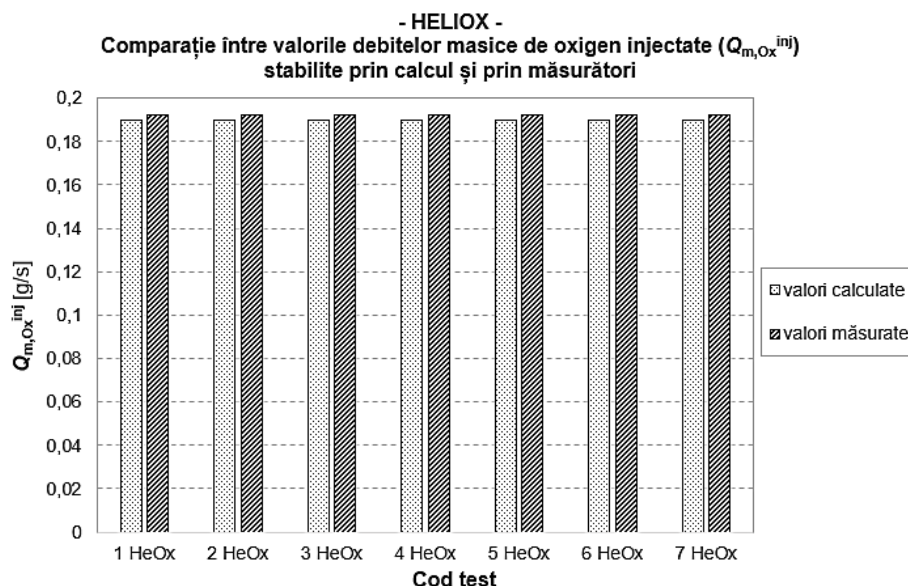


Figura 8.6 Reprezentare comparativă a valorilor debitelor masice de oxigen injectate ($Q^{inj}_{m,Ox}$) obținute prin calcul și prin măsurători, pentru cele șapte amestecuri respiratorii HELIOX

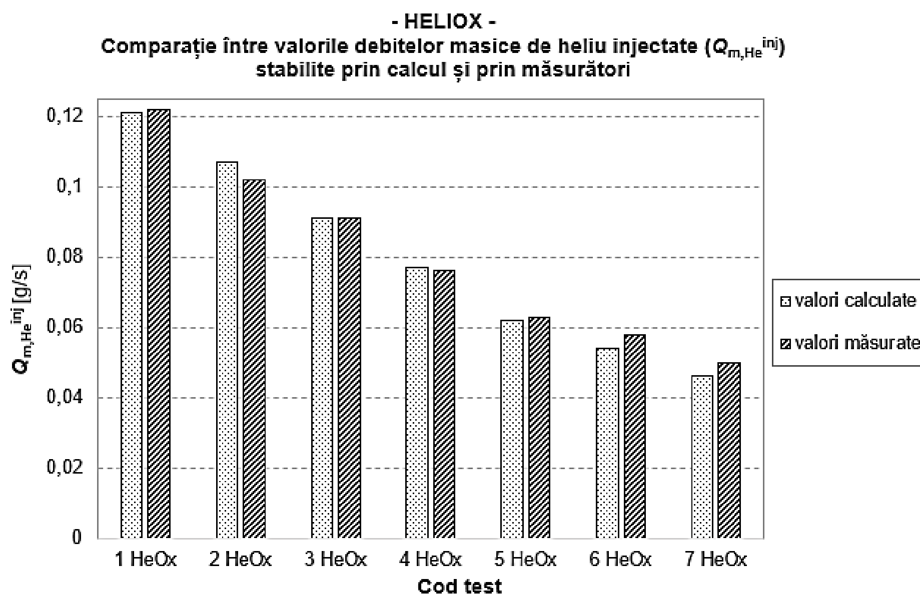


Figura 8.7 Reprezentare comparativă a valorilor debitelor masice de heliu injectate ($Q^{inj}_{m,He}$) obținute prin calcul și prin măsurători, pentru cele șapte amestecuri respiratorii HELIOX

Comparând valorile obținute prin calcul cu cele citite la rotametrul liniei pentru injectarea heliului (HRt) și exprimând procentual diferența, a rezultat: pentru testul 1 NiOx o diferență de 0,82 %, pentru testul 2 NiOx o diferență de 4,90 %, pentru testul 4 NiOx 1,31 %, pentru testul 5 NiOx 1,59 %, pentru testul 6 NiOx 6,89 %, iar pentru testul 7 NiOx 8 %.

8.5.3 Reprezentarea comparativă a valorilor obținute prin calcul și prin măsurători pentru debitul masic de oxigen ($Q_{m,Ox}^{inj}$), debitul masic de azot ($Q_{m,Ni}^{inj}$) și debitul masic de heliu ($Q_{m,He}^{inj}$), injectate pentru prepararea celor cinci amestecuri respiratorii TRIMIX studiate

În figura 8.8, figura 8.9 și figura 8.10 sunt prezentate, grafic, valorile obținute prin calcul și prin măsurători pentru debitul masic injectat de oxigen ($Q_{m,Ox}^{inj}$), debitul masic injectat de azot ($Q_{m,Ni}^{inj}$) și debitul masic injectat de heliu ($Q_{m,He}^{inj}$) pentru cele cinci amestecuri ternare (TRIMIX) studiate.

Din figura 8.8, care ilustrează valorile obținute pentru debitul masic de oxigen injectat ($Q_{m,Ox}^{inj}$), se remarcă diferențe cuprinse între 1 mg/s și 3 mg/s, rezultate prin aplicarea celor două metode de studiu (prin calcul și pe cale experimentală). Procentual, aceste diferențe dintre valorile calculate și valorile măsurate, au rezultat după cum urmează: la testul 1 TRI nu au rezultat diferențe între valorile obținute, la testul 2 TRI diferența este de 0,63%, la testul 3 TRI diferența este de 1,05 %, la testul 4 TRI diferența este de 1,41 %, iar la testul 5 TRI diferența este de 4,94 %.

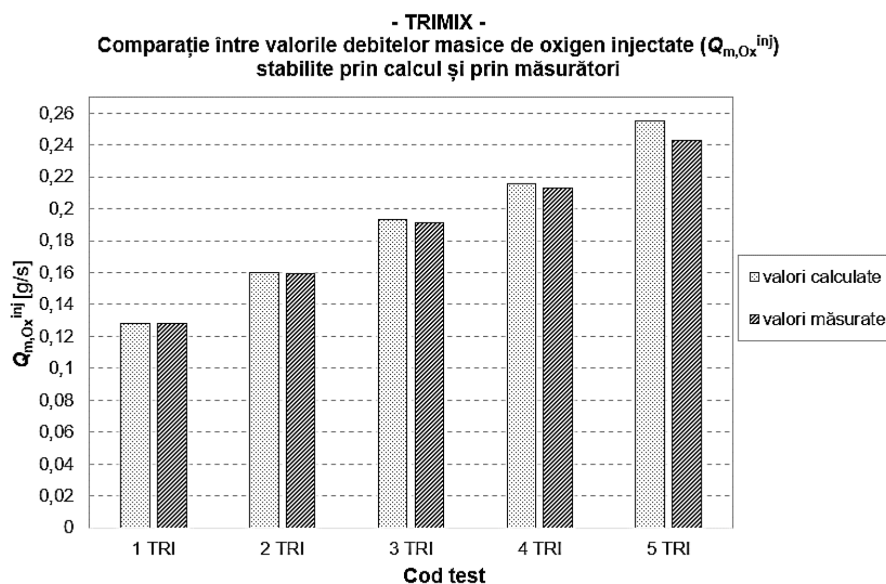


Figura 8.8 Reprezentare comparativă a valorilor debitelor masice de oxigen injectate ($Q_{m,Ox}^{inj}$) obținute prin calcul și prin măsurători, pentru cele cinci amestecuri respiratorii TRIMIX

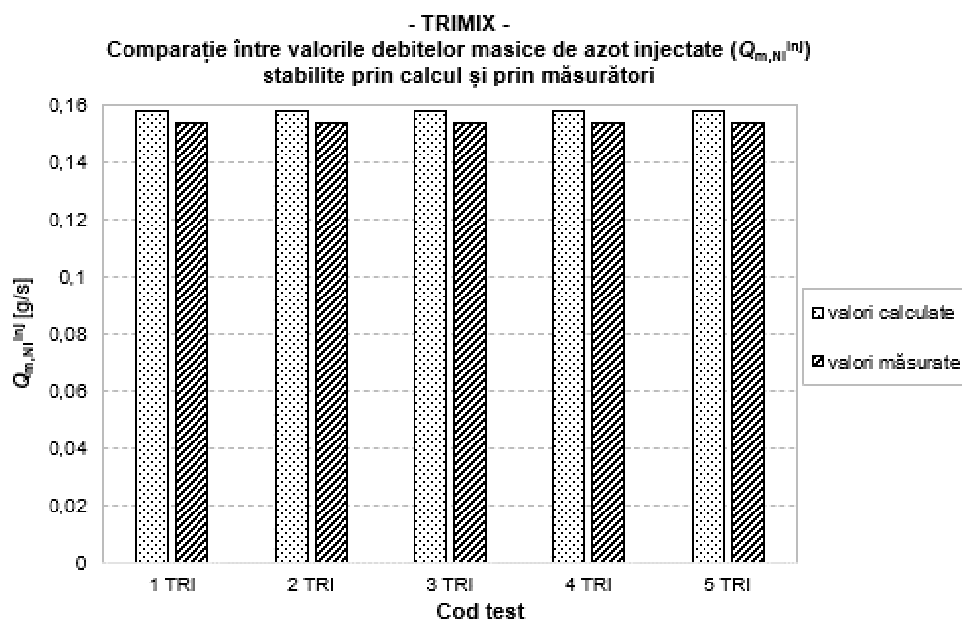


Figura 8.9 Reprezentare comparativă a valorilor debitelor masice de azot injectate ($Q_{m,Ni}^{inj}$) obținute prin calcul și prin măsurători, pentru cele cinci amestecuri respiratorii TRIMIX

În figura 8.9 sunt comparate valorile obținute prin cele două moduri de determinare folosite (prin calcul și prin măsurători), ce corespund debitului masic de azot injectat ($Q_{m,Ni}^{inj}$).

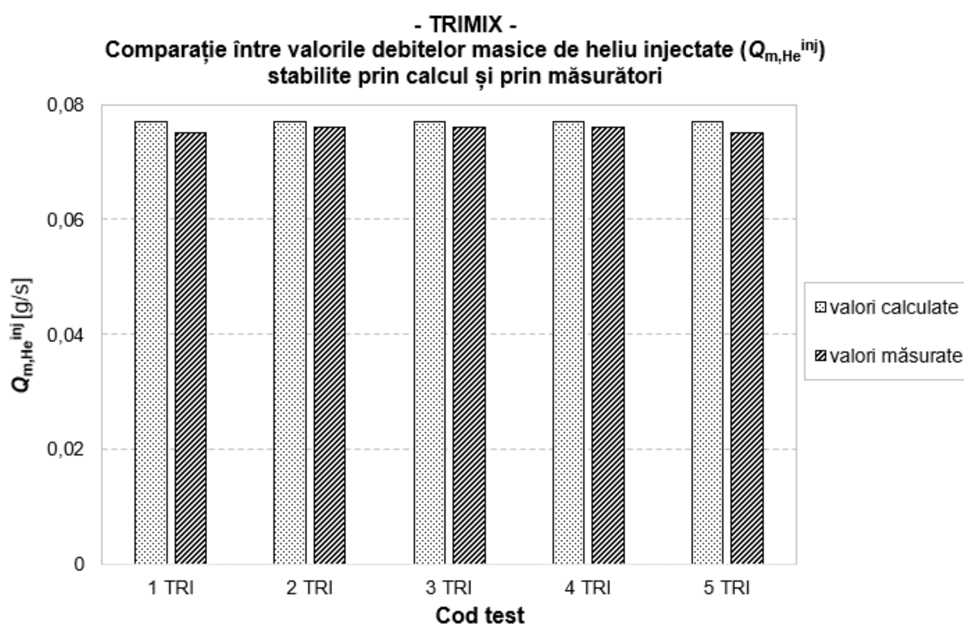


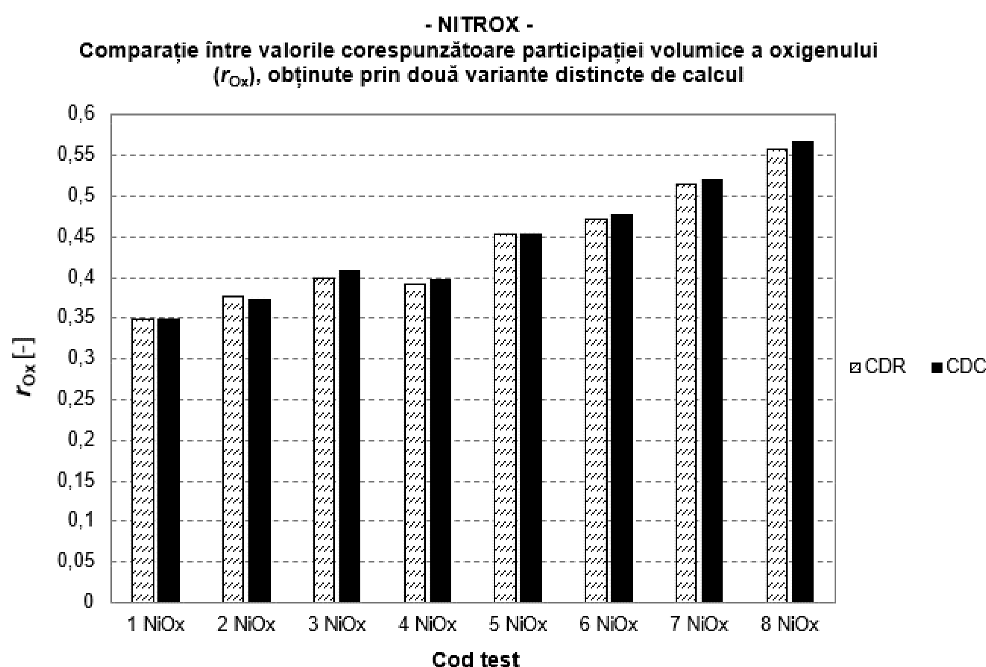
Figura 8.10 Reprezentare comparativă a valorilor debitelor masice de heliu injectate ($Q_{m,He}^{inj}$) obținute prin calcul și prin măsurători, pentru cele cinci amestecuri respiratorii TRIMIX

Diferențele înregistrate au fost de 4 mg/s pentru toate cele cinci amestecuri testate. Procentual a rezultat, de asemenea, aceeași diferență pentru toate testele și anume 2,59 % pentru toate cele cinci teste.

Din prezentarea comparativă a valorilor obținute pentru debitul masic de heliu injectat ($Q_{\mathrm{m,He}}^{\mathrm{inj}}$), din figura 8.10, se remarcă diferențe între valorile obținute prin cele două metode de determinare, de 1 mg/s pentru trei dintre testele efectuate (testele 2 TRI, 3 TRI și 4 TRI) și de 2 mg/s pentru două dintre acestea și anume 1 TRI și 5 TRI. Exprimate procentual, diferența dintre valorile calculate și cele măsurate sunt de 2,67 % pentru amestecurile preparate în cadrul testelor 1 TRI și 5 TRI si de 1,32 % pentru testele 2 TRI, 3 TRI și 4 TRI.

8.5.4 Reprezentarea comparativă a valorilor participației volumice a oxigenului (r_{Ox}) și a participației volumice a azotului (r_{Ni}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele opt teste de preparare a amestecurilor respiratorii NITROX

În figura 8.11, sunt prezentate grafic valorile participației volumice a oxigenului ($r_{\mathrm{Ox}}^{\mathrm{inj}}$), iar în figura 8.12 valorile participației volumice a azotului ($r_{\mathrm{Ni}}^{\mathrm{inj}}$), ce corespund celor opt teste ce au urmărit fabricarea de amestecuri NITROX.

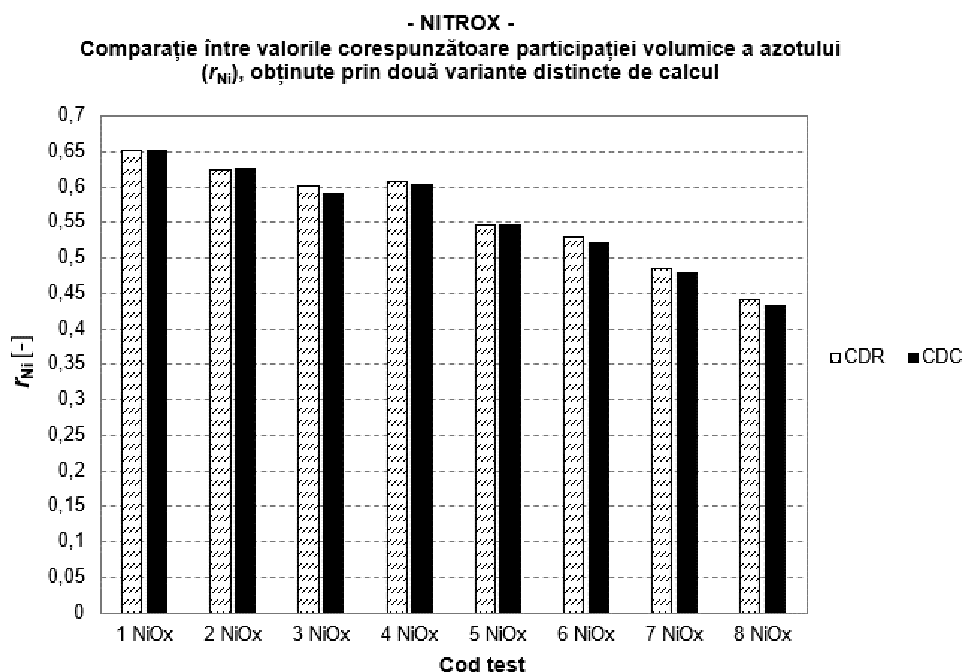


CDR – varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre; CDC - varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul.

Figura 8.11 Reprezentare comparativă a valorilor participației volumice a oxigenului (r_{Ox}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele opt teste de preparare a amestecului respirator NITROX

Valorile ce stau la baza acestor reprezentări grafice au fost obținute, un prim set, pornind de la valorile debitului masic injectat, citit la rotametrele liniilor de oxigen și azot ale instalației experimentale ($Q_{m,Ox}^{inj}$ și $Q_{m,Ni}^{inj}$ - CDR), iar cel de al doilea set folosind valorile debitului masic injectat determinat prin calcul ($Q_{m,Ox}^{inj}$ și $Q_{m,Ni}^{inj}$ - CDC). Valorile numerice astfel obținute, ce stau la baza graficelor menționate anterior, sunt date în tabelul 8.10 și tabelul 8.11 din prezentul capitol.

Comparând rezultatele obținute prin aplicarea celor două variante de calcul folosite pentru stabilirea participației volumice a oxigenului (r_{Ox}), (figura 8.11), diferențele dintre valorile rezultate sunt: pentru testul 1 NiOx valoarea obținută prin varianta CDC (varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul) diferă cu 0,29 % de valoarea obținută prin aplicarea variantei CDR (varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre), pentru testul 2 NiOx diferența este de 0,80 %, pentru testul 3 NiOx diferența este de 2,50 %, pentru testul 4 NiOx diferența este de 1,28 %, pentru testul 6 NiOx diferența este de 1,49 %, pentru testul 7 NiOx diferența este de 1,36 %, iar pentru testul 8 NiOx diferența este de 1,61 %. În cazul testului 5 NiOx prin ambele variante de calcul s-au obținut aceleași rezultate.



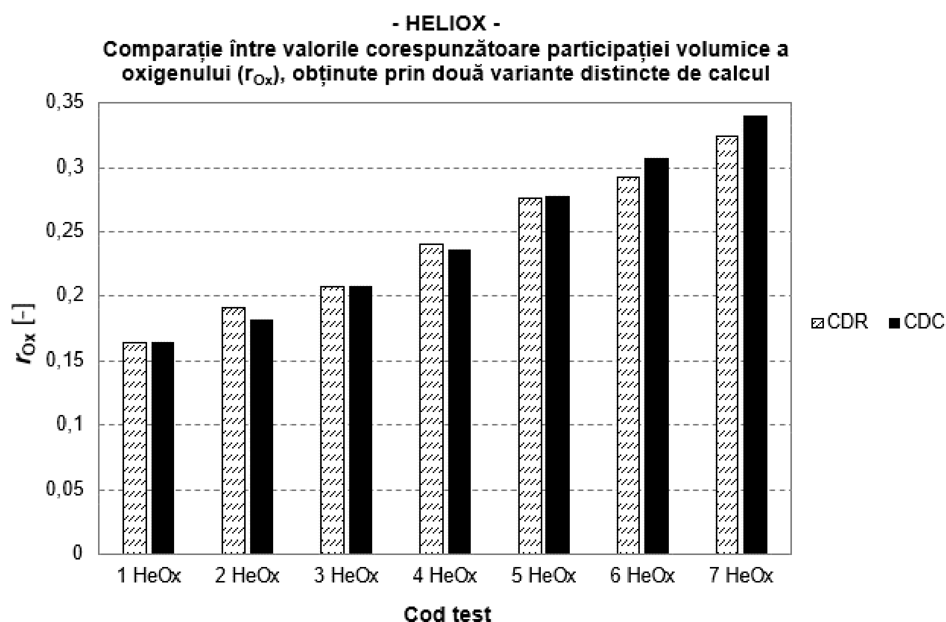
CDR – varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre; CDC - varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul.

Figura 8.12 Reprezentare comparativă a valorilor participației volumice a azotului (r_{Ni}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele opt teste de preparare a amestecului respirator NITROX

În ceea ce privește valorile participației volumice a azotului (r_{Ni}) din figura 8.12, se observă următoarele diferențe între rezultatele obținute prin aplicarea celor două metode de calcul: pentru testul 1 NiOx valoarea obținută prin varianta CDC diferă cu 0,15 % de valoarea obținută prin aplicarea variantei CDR, pentru testul 2 NiOx diferența este de 0,48 %, pentru testul 3 NiOx diferența este de 1,66 %, pentru testul 4 NiOx diferența este de 0,82 %, pentru testul 6 NiOx diferența este de 1,32 %, pentru testul 7 NiOx diferența este de 1,44 %, iar pentru testul 8 NiOx diferența este de 2,04 %. În cazul testului 5 NiOx, rezultatele obținute sunt aceleași.

8.5.5 Reprezentarea comparativă a valorilor participației volumice a oxigenului (r_{Ox}) și a participației volumice a heliului (r_{He}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele șapte teste de preparare a amestecurilor respiratorii HELIOX

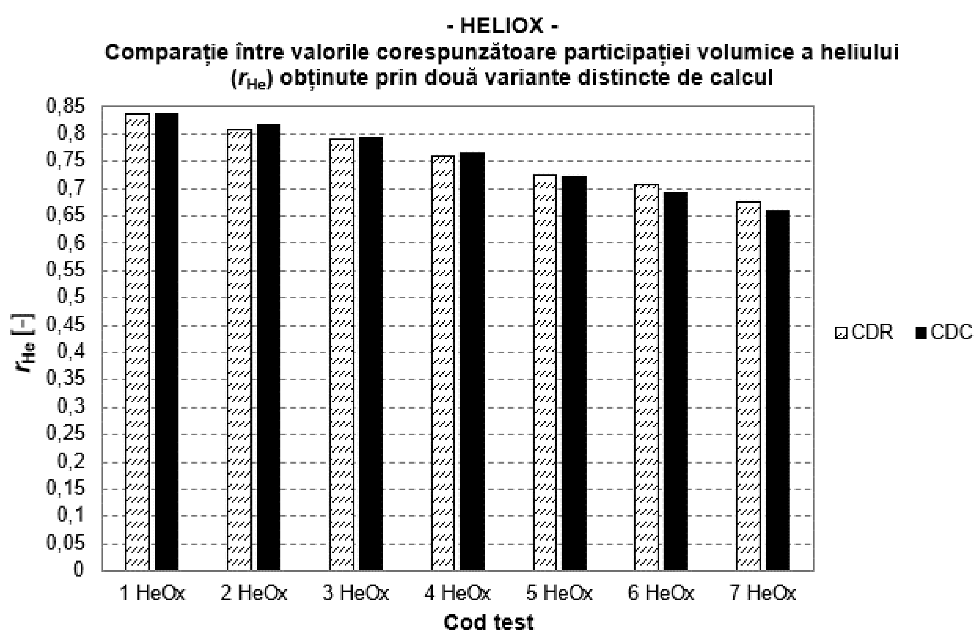
În figura 8.13 și figura 8.14, sunt reprezentate grafic valorile participației volumice a celor două gaze (oxigen și heliu) utilizate în cele șapte teste ce au urmărit fabricarea amestecurilor HELIOX propuse. Seturile de valori reprezentate în aceste grafice, au fost obținute prin aplicarea variantelor de calcul CDR și CDC.



CDR – varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre; CDC - varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul.

Figura 8.13 Reprezentare comparativă a valorilor participației volumice a oxigenului (r_{Ox}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele șapte teste de preparare a amestecului respirator HELIOX

Graficul prezentat în figura 8.13 arată existența unor diferențe între valorile participației volumice a oxigenului (r_{Ox}) rezultate prin aplicarea celor două variante de calcul. Analizând datele obținute, s-a stabilit diferența existentă între valorile rezultate prin aplicarea variantei de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul (CDC) și cele obținute prin aplicarea variantei de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre (CDR). Excepție face testul 1 HeOx pentru care, în urma aplicării ambelor variante de calcul, s-au obținut aceleași rezultate. Pentru restul testelor diferențele sunt: la testul 2 HeOx diferența este de 5,24 %, la testul 3 HeOx diferența este de 0,48 %, la testul 4 HeOx diferența este de 1,67 %, la testul 5 HeOx diferența este de 0,36 %, la testul 6 HeOx diferența este de 4,44 %, iar la testul 7 HeOx diferența este de 4,94 %. Pentru valorile ce corespund participației volumice a heliului (r_{He}), (figura 8.14), diferențele dintre rezultatele obținute prin cele două variante de calcul sunt: pentru testul 2 HeOx diferența este de 1,11 %, pentru testul 3 HeOx diferența este de 0,13 %, pentru testul 4 HeOx diferența este de 0,53 %, pentru testul 5 HeOx diferența este de 0,14 %, pentru testul 6 HeOx diferența este de 1,84 %, iar pentru testul 7 HeOx diferența este de 2,37 %. La primul test, 1 HeOx, s-a obținut aceeași valoare a participației volumice a heliului (r_{He}), în cazul ambelor variante de calcul.

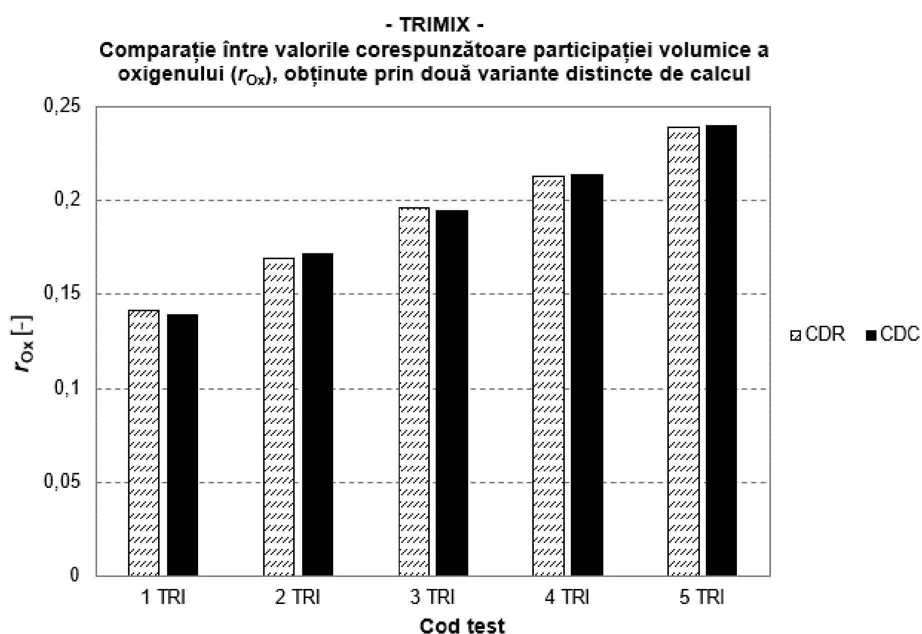


CDR – varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre; CDC - varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul.

Figura 8.14 Reprezentare comparativă a valorilor participației volumice a heliului (r_{He}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele șapte teste de preparare a amestecului respirator HELIOX

8.5.6 Reprezentarea comparativă a valorilor participației volumice a oxigenului (r_{Ox}), a participației volumice a azotului (r_{Ni}) și a participației volumice a heliului (r_{He}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele cinci teste de preparare a amestecurilor respiratorii TRIMIX

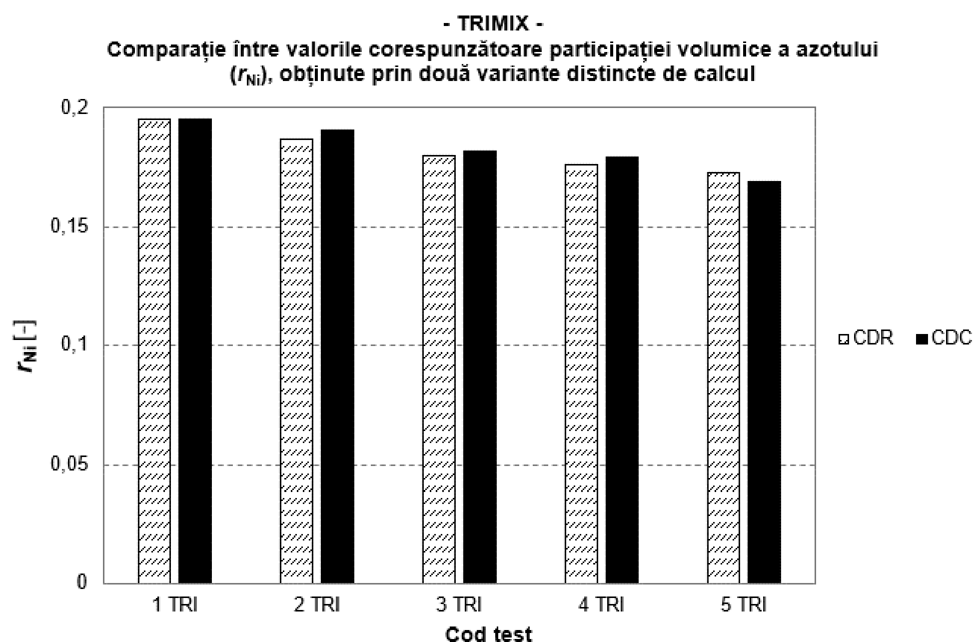
În figura 8.15, figura 8.16 și figura 8.17, sunt reprezentate grafic valorile participației volumice ale gazelor folosite la fabricarea amestecului ternar TRIMIX, valori obținute prin aplicarea variantelor de calcul CDR (varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre) și CDC (varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul).



CDR – varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre; CDC - varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul.

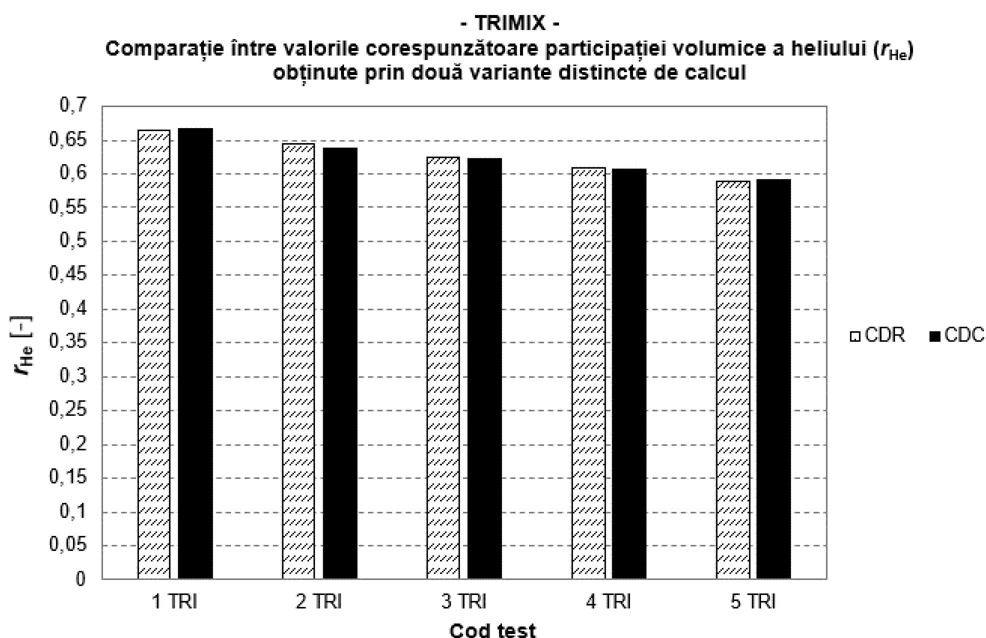
Figura 8.15 Reprezentare comparativă a valorilor participației volumice a oxigenului (r_{Ox}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele cinci teste de preparare a amestecului respirator TRIMIX

Din figura 8.15, se remarcă faptul că rezultatele obținute prin aplicarea celor două variante de calcul a participației volumice a oxigenului (r_{Ox}), sunt relativ apropiate pentru toate cele cinci teste efectuate, cu diferențe mai mari în cazul primelor două amestecuri (1 TRI și 2 TRI) și diferențe mai mici între valori pentru ultimele trei teste (3 TRI, 4 TRI și 5 TRI). Din analiza cantitativă a valorilor obținute, a decurs că diferența între rezultatele variantei de calcul CDC și rezultatele variantei CDR la determinarea lui r_{Ox} este de 2,11 % pentru testul 1 TRI, 1,76 % pentru testul 2 TRI, de 0,51 % pentru testul 3 TRI, de 0,47 % pentru testul 4 TRI și de 0,42 % pentru testul 5 TRI.



CDR – varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre; CDC - varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul.

Figura 8.16 Reprezentare comparativă a valorilor participației volumice a azotului (r_{Ni}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele cinci teste de preparare a amestecului respirator TRIMIX



CDR – varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre; CDC - varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul.

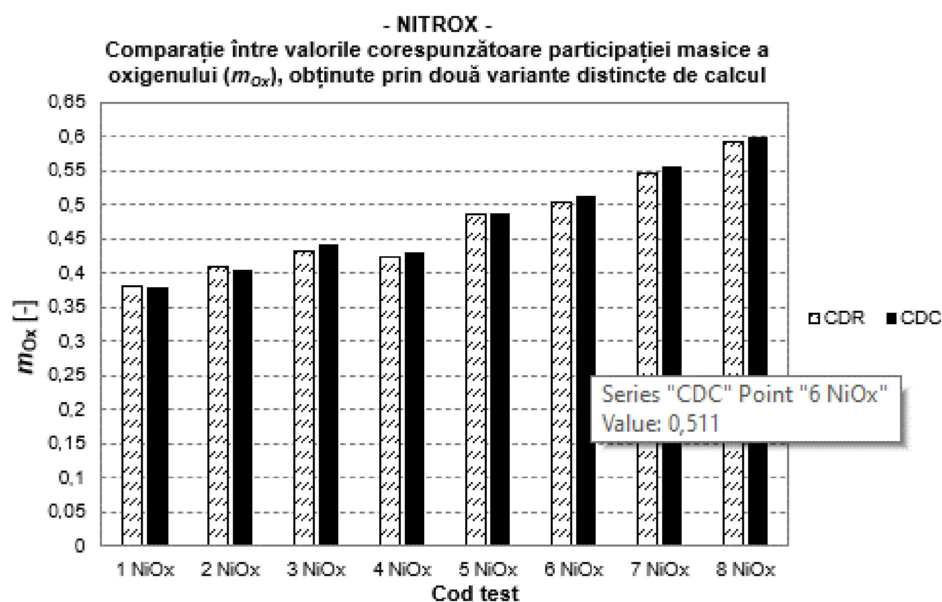
Figura 8.17 Reprezentare comparativă a valorilor participației volumice a heliului (r_{He}), obținute prin două variante calcul, pentru cele cinci teste de preparare a amestecului respirator TRIMIX

Pentru participația volumică a azotului (r_{Ni}), pentru care s-au obținut prin cele două variante de calcul aplicate valorile prezentate grafic în figura 8.16, diferențele între rezultatele obținute sunt următoarele: pentru testul 2 TRI diferența de 2,14 %, pentru testul 3 TRI diferența de 1,11 %, pentru testul 4 TRI diferența de 1,70 %, pentru testul 5 TRI diferența de 2,31 %. La testul 1 TRI s-au obținut aceleași rezultate prin ambele variante de calcul.

În cazul celei de a treia componente folosită la prepararea amestecurilor TRIMIX, și anume heliul, diferența între valorile participației volumice (r_{He}), obținute prin varianta de calcul CDC față de cele obținute prin aplicarea variantei CDR, sunt: la testul 1 TRI diferența de 0,30 %, la testul 2 TRI diferența de 1,09 %, la testul 3 TRI diferența de 0,16 %, la testul 4 TRI diferența de 0,49 %, iar la testul 5 TRI diferența de 0,34 %.

8.5.7 Reprezentarea comparativă a valorilor participației masice a oxigenului (m_{Ox}) și a participației masice a azotului (m_{Ni}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele opt teste de preparare a amestecurilor respiratorii NITROX

Transpunerea grafică a rezultatelor obținute prin aplicarea variantelor de calcul CDR (varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre) și CDC (varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul), privind participația masică a oxigenului (m_{Ox}) și a azotului (m_{Ni}) pentru cele opt amestecuri respiratorii NITROX studiate, este prezentată în figurile 8.18 și 8.19.

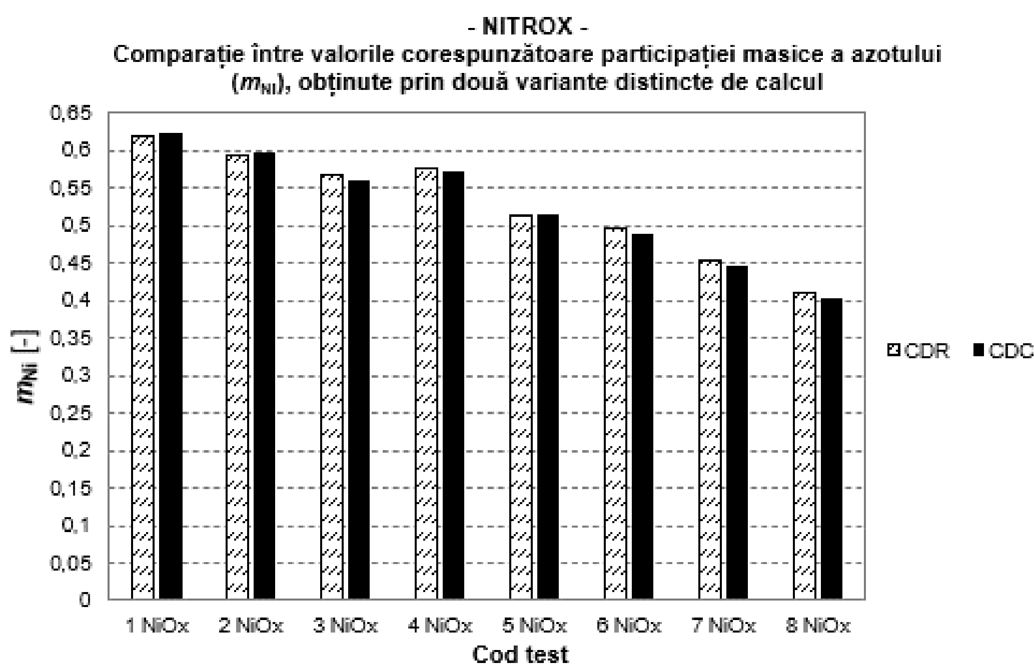


CDR – varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre; CDC - varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul.

Figura 8.18 Reprezentare comparativă a valorilor participației masice a oxigenului (m_{Ox}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele opt teste de preparare a amestecului respirator NITROX

Valorile participației masice a oxigenului (m_{Ox}), obținute prin cele două variante de calcul, prezintă în cazul testelor ce au urmărit prepararea amestecului NITROX (figura 8.18) următoarele diferențe: pentru testul 1 NiOx diferența este de 0,26 %, pentru testul 2 NiOx diferența este de 0,74 %, pentru testul 3 NiOx diferența este de 2,55 %, pentru testul 4 NiOx diferența este de 1,18 %, pentru testul 5 NiOx s-au obținut aceleași rezultate prin ambele variante de calcul, pentru testul 6 NiOx diferența este de 1,39 %, pentru testul 7 NiOx diferența este de 1,28 %, iar pentru testul 8 NiOx diferența este de 1,35 %.

În cazul participației masice a azotului (m_{Ni}), valorile obținute sunt reprezentate în figura 8.19. Diferențele dintre rezultatele obținute prin aplicarea variantei de calcul CDC față de cele obținute cu varianta CDR sunt: pentru testul 1 NiOx diferența este de 0,15 %, pentru testul 2 NiOx diferența este de 0,48 %, pentru testul 3 NiOx diferența este de 1,66 %, pentru testul 4 NiOx diferența este de 0,82 %, pentru testul 5 NiOx s-au obținut aceleași rezultate prin ambele variante de calcul, pentru testul 6 NiOx diferența este de 1,32 %, pentru testul 7 NiOx diferența este de 1,44 % și pentru testul 8 NiOx diferența este de 2,04 %.

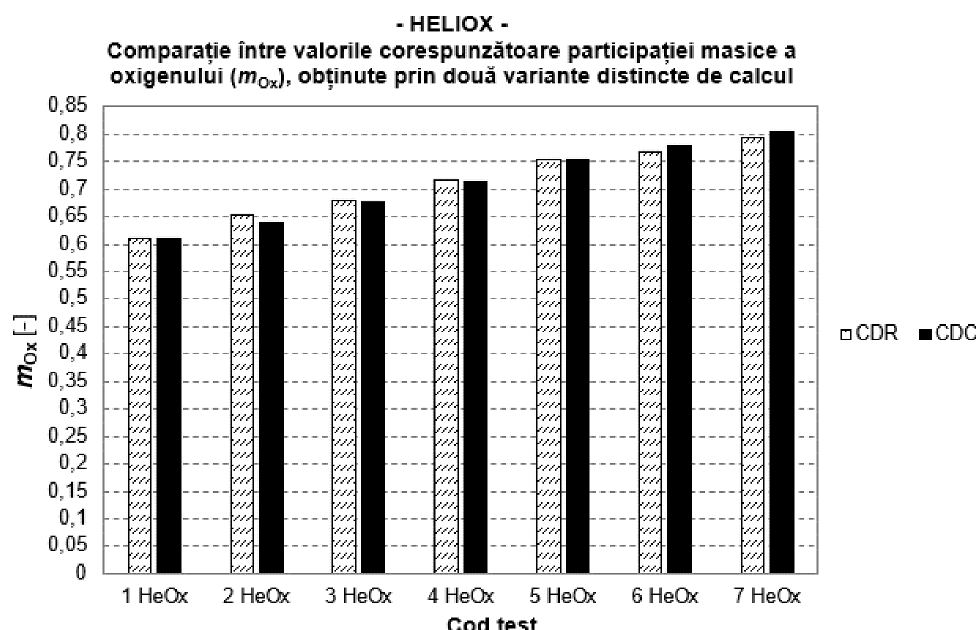


CDR – varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre; CDC - varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul.

Figura 8.19 Reprezentare comparativă a valorilor participației masice a azotului (m_{Ni}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele opt teste de preparare a amestecului respirator NITROX

8.5.8 Reprezentarea comparativă a valorilor participației masice a oxigenului (m_{Ox}) și a participației masice a heliului (m_{He}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele șapte teste de preparare a amestecurilor respiratorii HELIOX

Valorile corespunzătoare participației masice a oxigenului (m_{Ox}) în cazul celor șapte teste aferente amestecurilor HELIOX studiate prin intermediul celor două variante de calcul, CDR respectiv CDC, sunt reprezentate in graficul din figura 8.20.



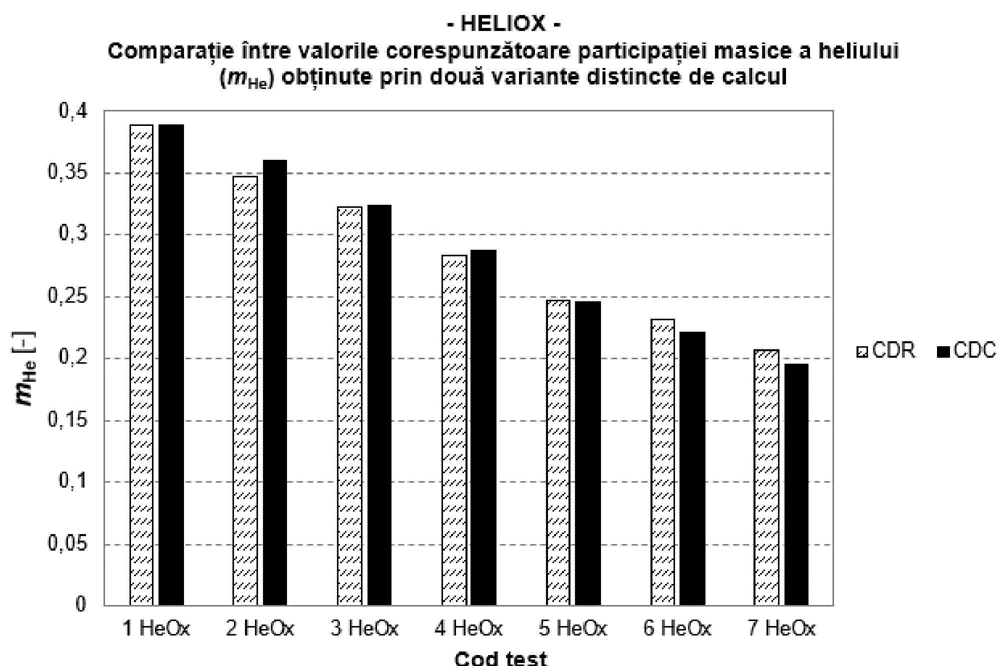
CDR – varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre; CDC - varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul.

Figura 8.20 Reprezentare comparativă a valorilor participației masice a oxigenului (m_{Ox}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele șapte teste de preparare a amestecului respirator HELIOX

În urma comparării datelor obținute prin ambele variante de calcul, diferențe, exprimate procentual, între valorile participației masice a oxigenului (m_{Ox}) obținute prin varianta de calcul CDC și valorile obținute prin aplicarea variantei de calcul CDR sunt următoarele: pentru testul 1 HeOx s-au obținut aceleași rezultate prin ambele variante de calcul, pentru testul 2 HeOx diferența este de 1,99 %, pentru testul 3 HeOx diferența este de 0,29 %, pentru testul 4 HeOx diferența este de 0,56 %, pentru testul 5 HeOx diferența este de 0,13 %, pentru testul 6 HeOx diferența este de 1,43 %, iar pentru testul 7 HeOx diferența este de 1,51 %.

În figura 8.21 sunt reprezentate valorile participației masice a heliului (m_{He}), valori obținute prin aplicarea celor două variante de calcul, CDR respectiv CDC.

Diferențele dintre valorile participației masice a heliului (m_{He}), rezultate prin aplicarea variantei de calcul CDC față de valorile obținute prin aplicarea variantei de calcul CDR sunt: pentru testul 1 HeOx s-au obținut aceleași rezultate prin ambele variante de calcul, pentru testul 2 HeOx diferența este de 3,75 %, pentru testul 3 HeOx diferența este de 0,62 %, pentru testul 4 HeOx diferența este de 1,41 %, pentru testul 5 HeOx diferența este de 0,40 %, pentru testul 6 HeOx diferența este de 4,74 %, iar pentru testul 7 HeOx diferența este de 5,80 %.



CDR – varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre; CDC - varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul.

Figura 8.21 Reprezentare comparativă a valorilor participației masice a heliului (m_{He}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele șapte teste de preparare a amestecului respirator HELIOX

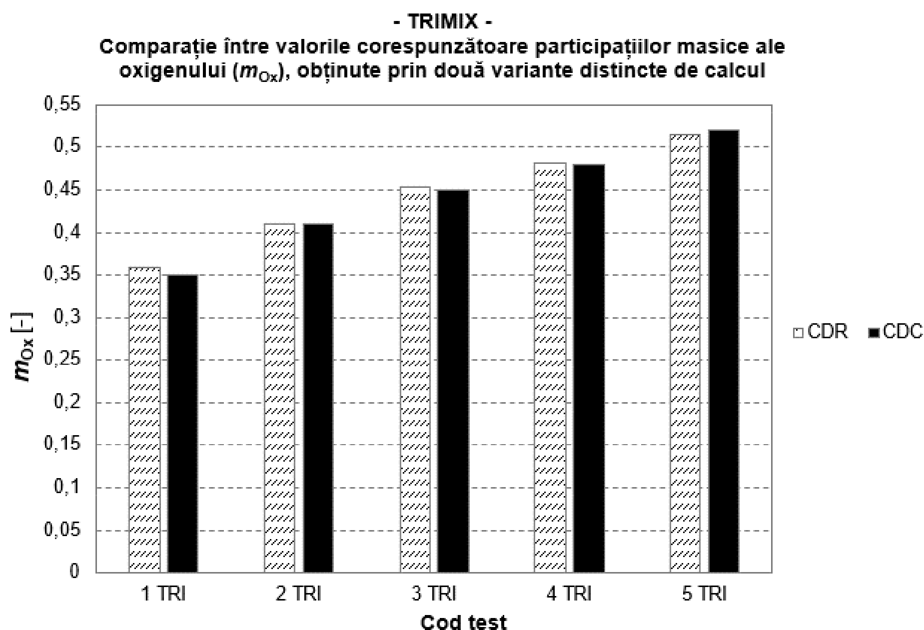
8.5.9 Reprezentarea comparativă a valorilor participației masice a oxigenului (m_{Ox}), a participației masice a azotului (m_{Ni}) și a participației masice a heliului (m_{He}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele cinci teste de preparare a amestecurilor respiratorii TRIMIX

Valorile participației masice a oxigenului (m_{Ox}), rezultate pe baza celor două variante de calcul, CDC și CDR, aplicate amestecului respirabil TRIMIX, sunt reprezentate în figura 8.22.

Comparând rezultatele obținute prin aplicarea variantei de calcul CDC, cu cele rezultate prin aplicarea variantei de calcul CDR, s-au obținut următoarele

diferențe: la testul 1TRI diferența este de 2,50 %, la testul 2 TRI diferența este de 0,25 %, la testul 3 TRI diferența este de 0,88 %, la testul 4 TRI diferența este de 0,21 %, iar la testul 5 TRI diferența este de 0,97 %.

În figura 8.23 sunt redate grafic valorile participației masice a azotului (m_{Ni}), obținute prin calcul folosind cele două variante, CDC respectiv variante CDR, valori ce corespund amestecurilor TRIMIX studiate în cele cinci teste efectuate.

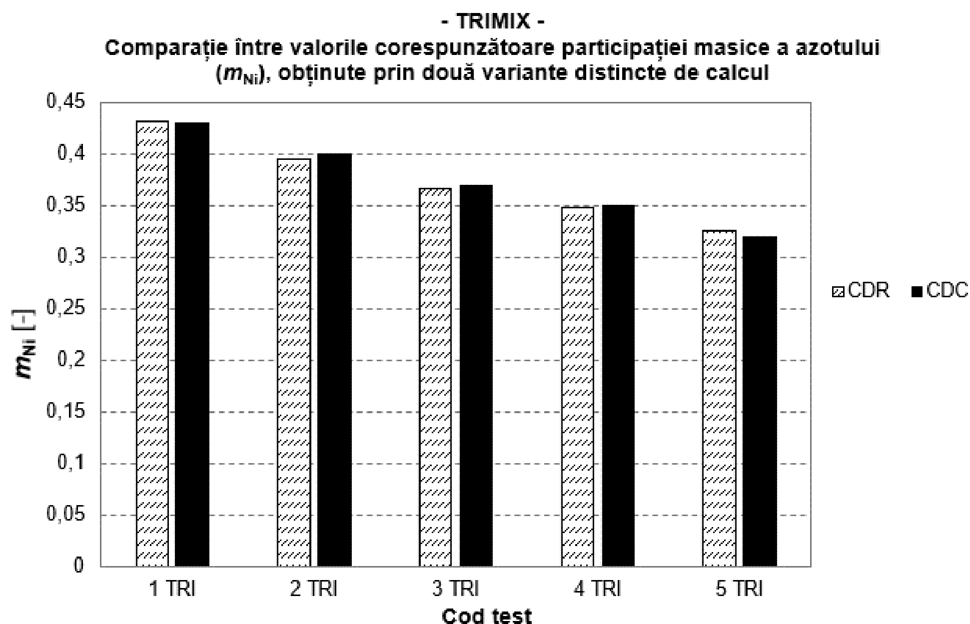


CDR – varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre; CDC - varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul.

Figura 8.22 Reprezentare comparativă a valorilor participației masice a oxigenului (m_{Ox}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele cinci teste de preparare a amestecului respirator TRIMIX

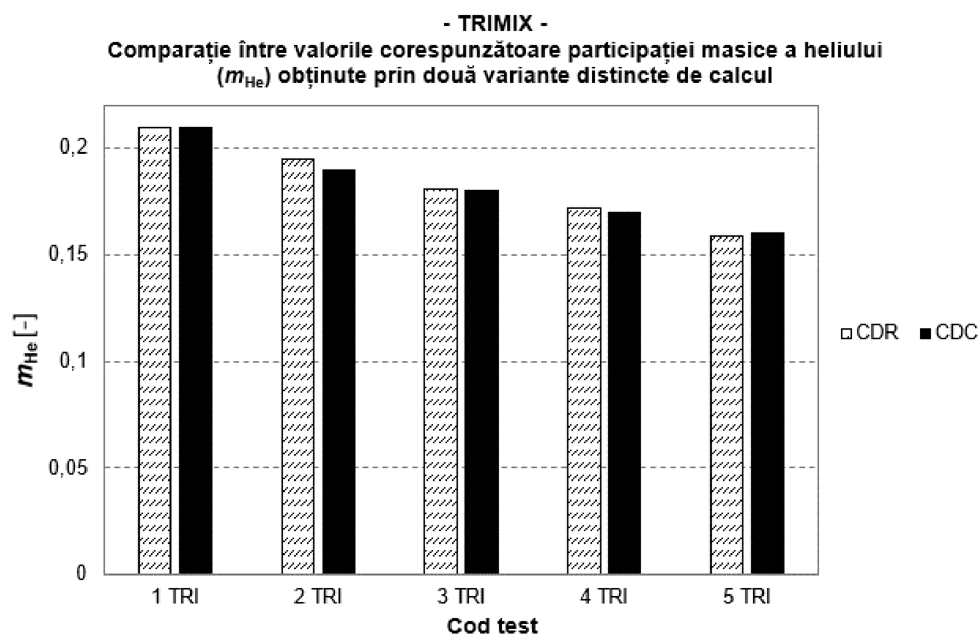
Diferențele dintre valorile participației masice a azotului (m_{Ni}), rezultate în urma comparării valorilor obținute prin aplicarea variantei de calcul CDC cu valorile rezultate prin aplicarea variantei de calcul CDR sunt următoarele: în cazul testului 1 TRI diferența este de 0,23 %, în cazul testului 2 TRI diferența este de 1,01 %, în cazul testului 3 TRI diferența este de 1,09 %, în cazul testului 4 TRI diferența este de 0,57 %, iar în cazul testului 5 TRI diferența este de 1,84 %.

În figura 8.24 sunt prezentate grafic valorile participației masice a heliului (m_{He}), valori obținute prin aplicarea în cazul amestecului TRIMIX a celor două variante de calcul propuse, CDC respectiv variante CDR.



CDR – varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre; CDC - varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul.

Figura 8.23 Reprezentare comparativă a valorilor participației masice a azotului (m_{Ni}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele cinci teste de preparare a amestecului respirator TRIMIX



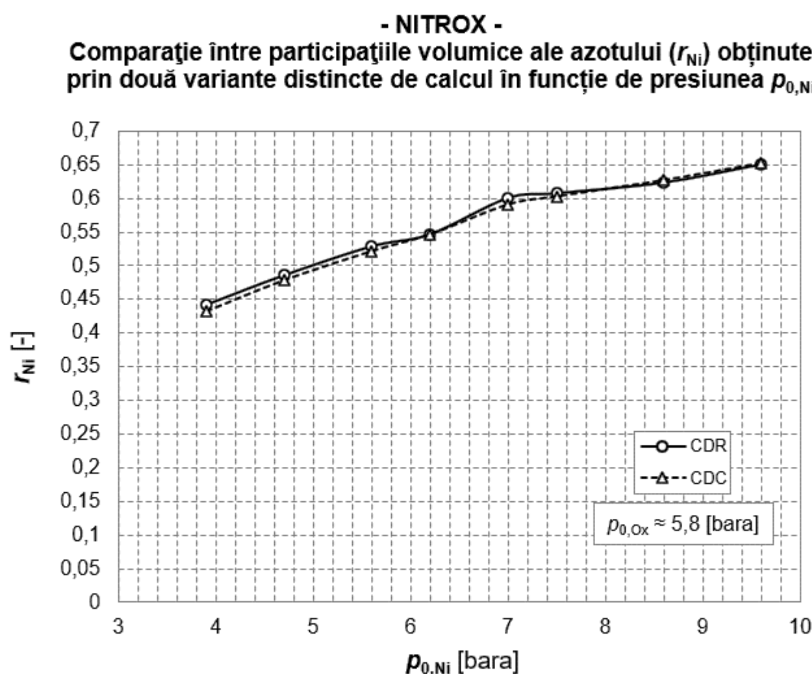
CDR – varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre; CDC - varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul.

Figura 8.24 Reprezentare comparativă a valorilor participației masice a heliului (m_{He}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele cinci teste de preparare a amestecului respirator TRIMIX

Rezultatele obținute arată existența următoarelor diferențe între valorile lui m_{He} obținute cu varianta de calcul CDC față de valorile obținute cu varianta de calcul CDR: la testul 2 TRI diferența este de 2,56 %, la testul 3 TRI deferența este de 0,55 %, la testul 4 TRI diferența este de 1,16 % iar la testul 5 TRI diferența este de 0,63 %. În cazul testului 1 TRI s-au obținut prin ambele variante de calcul aceleași valori.

8.5.10 Reprezentarea comparativă a valorilor participației volumice a azotului (r_{Ni}), în funcție de presiunea de alimentare a ajutajului de injecție, obținute prin două variante de calcul, pentru cele opt teste de preparare a amestecurilor respiratorii NITROX

În figura 8.25 este prezentată variația valorii participației volumice a azotului (r_{Ni}) din amestecul fabricat NITROX, funcție de presiunea de alimentare a ajutajului de injecție a azotului ($p_{0,Ni}$), în condițiile în care presiunea de alimentare a ajutajului de injecție a oxigenului ($p_{0,Ox}$) pentru fabricarea amestecului NITROX este menținută la o valoare constantă. Valorile obținute au fost calculate prin cele două variante și anume varianta folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre (CDR) și varianta folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul (CDC).



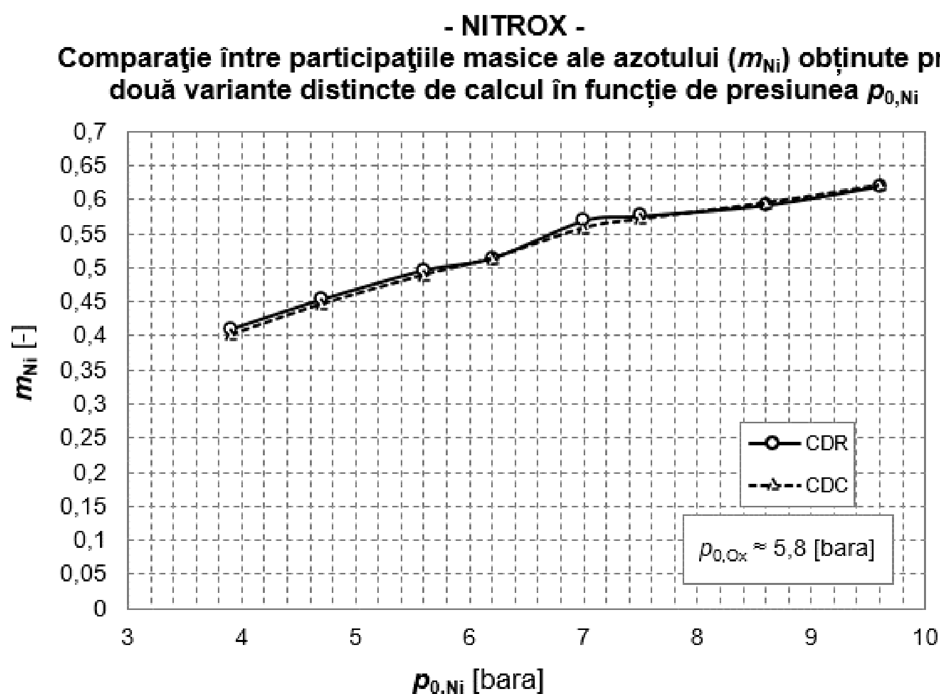
CDR – varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre; CDC - varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul.

Figura 8.25 Reprezentare comparativă a valorilor participației volumice a azotului (r_{Ni}), obținute prin două variante de calcul, în funcție de presiunea $p_{0,Ni}$ pentru amestec respirator NITROX

Comparând valorile lui r_{Ni} obținute prin aplicarea variantei de calcul CDC cu valorile rezultate cu varianta CDR, s-a constatat că la presiunea $p_{0,Ni}$ = 3,9 bar - scară absolută (bara), diferența între cele două rezultate este de 2,04 %, la presiunea $p_{0,Ni}$ = 4,7 bara diferența este de 1,44 %, la presiunea $p_{0,Ni}$ = 5,6 bara diferența este de 1,32 %, la presiunea $p_{0,Ni}$ = 6,2 bara s-au obținut aceleași valori prin ambele variante de calcul, la presiunea $p_{0,Ni}$ = 7,5 bara diferența este de 0,82 %, la presiunea $p_{0,Ni}$ = 7 bara diferența este de 1,66 %, la presiunea $p_{0,Ni}$ = 8,6 % bara diferența este de 0,48 %, iar la $p_{0,Ni}$ = 9,6 % diferența este de 0,15 %.

8.5.11 Reprezentarea comparativă a valorilor participației masice a azotului (m_{Ni}), în funcție de presiunea de alimentare a ajutajului de injecție, obținute prin două variante de calcul, pentru cele opt teste de preparare a amestecurilor respiratorii NITROX

Prezentarea grafică, comparativă, a valorilor participației masice a azotului (m_{Ni}) din amestecul NITROX preparat, obținute prin cele două variante de calcul și în aceleași condiții de studiu, este redată în figura 8.26.



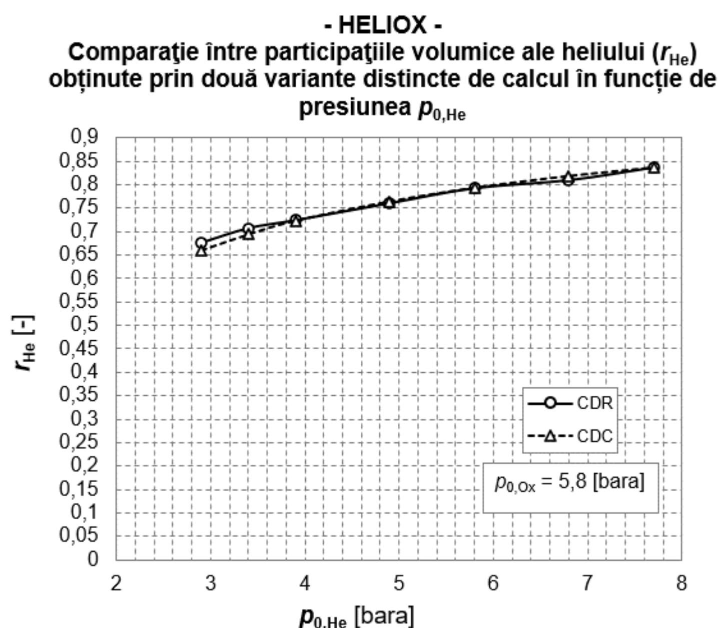
CDR – varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre; CDC - varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul.

Figura 8.26 Reprezentare comparativă a valorilor participației masice a azotului (m_{Ni}), obținute prin două variante de calcul, în funcție de presiunea $p_{0,Ni}$ pentru amestec respirator NITROX

Diferența dintre valorile lui m_{Ni} obținute prin cele două variante de calcul sunt următoarele: la presiunea $p_{0,Ni}$ = 3,9 bara, diferența este de 1,96 %, la presiunea $p_{0,Ni}$ = 4,7 bara, diferența este de 1,55 %, la presiunea $p_{0,Ni}$ = 5,6 bara, diferența este de 1,41 %, la presiunea $p_{0,Ni}$ = 6,2 bara nu există diferențe între valorile obținute, la presiunea $p_{0,Ni}$ = 7,5 bara diferența este de 0,87 %, la presiunea $p_{0,Ni}$ = 7 bara diferența este de 1,93 %, la presiunea $p_{0,Ni}$ = 8,6 bara diferența este de 0,51 %, iar la $p_{0,Ni}$ = 9,6 % diferența este de 0,16 %.

8.5.12 Reprezentarea comparativă a valorilor participației volumice a heliului (r_{He}), în funcție de presiunea de alimentare a ajutajului de injecție, obținute prin două variante de calcul, pentru cele șapte teste de preparare a amestecurilor respiratorii HELIOX

Pentru amestecurile HELIOX, în figura 8.27 este prezentată variația valorii participației volumice a heliului (r_{He}), funcție de presiunea $p_{0,He}$, în condițiile în care presiunea oxigenului la alimentarea ajutajului de injecție a oxigenului $p_{0,Ox}$ pentru fabricarea acestui amestec binar a fost menținută la o valoare constantă. Valorile au fost obținute prin calcul aplicând cele două variante și anume varianta CDR și varianta CDC.



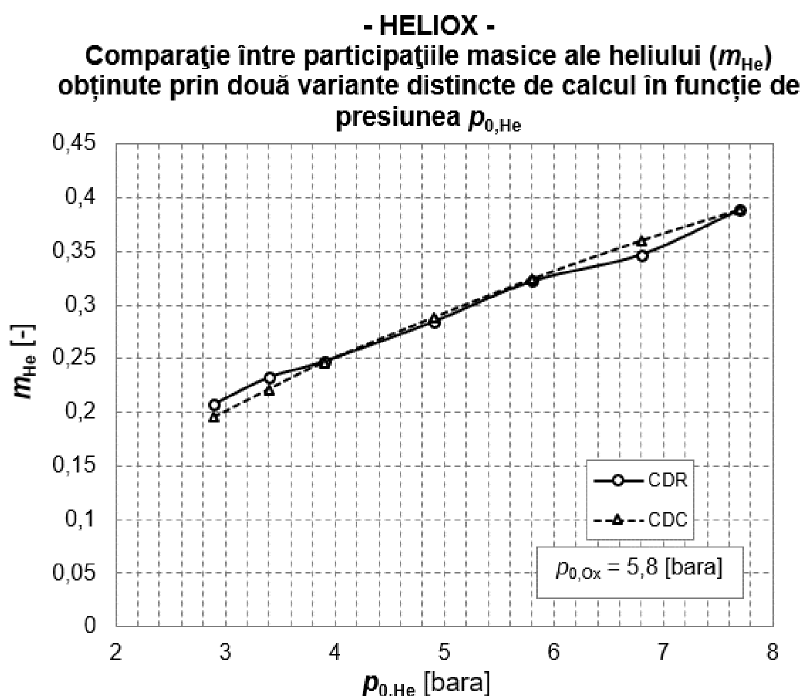
CDR – varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre; CDC - varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul.

Figura 8.27 Reprezentare comparativă a valorilor participației volumice a heliului (r_{He}), obținute prin două variante de calcul, în funcție de presiunea $p_{0,He}$ pentru amestec respirator HELIOX

Prin compararea rezultatelor, s-au remarcat următoarele diferențe între valorile participației volumice r_{He} obținute prin variata de calcul CDC față de cele rezultate cu varianta de calcul CDR: la presiunea de 2,9 bara diferența între cele două valori este de 2,37 %, la presiunea de 3,4 bara diferența între cele două valori este de 1,84 %, la presiunea de 3,9 bara diferența între cele două valori este de 0,14 %, la presiunea de 4,9 bara diferența între cele două valori este de 0,53 %, la presiunea de 5,8 bara diferența între cele două valori este de 0,13 %, la presiunea de 6,8 bara diferența între cele două valori este de 1,11 %. Pentru ultima valoare a presiunii și anume $p_{0,He}$ = 7,7 bara, nu există diferențe între valorile obținute.

8.5.13 Reprezentarea comparativă a valorilor participației masice a heliului (m_{He}), în funcție de presiunea de alimentare a ajutajului de injecție, obținute prin două variante de calcul, pentru cele șapte teste de preparare a amestecurilor respiratorii HELIOX

În figura 8.28 sunt transpuse grafic rezultatele obținute pentru participația masică a heliului m_{He} în aceleași condiții de studiu.



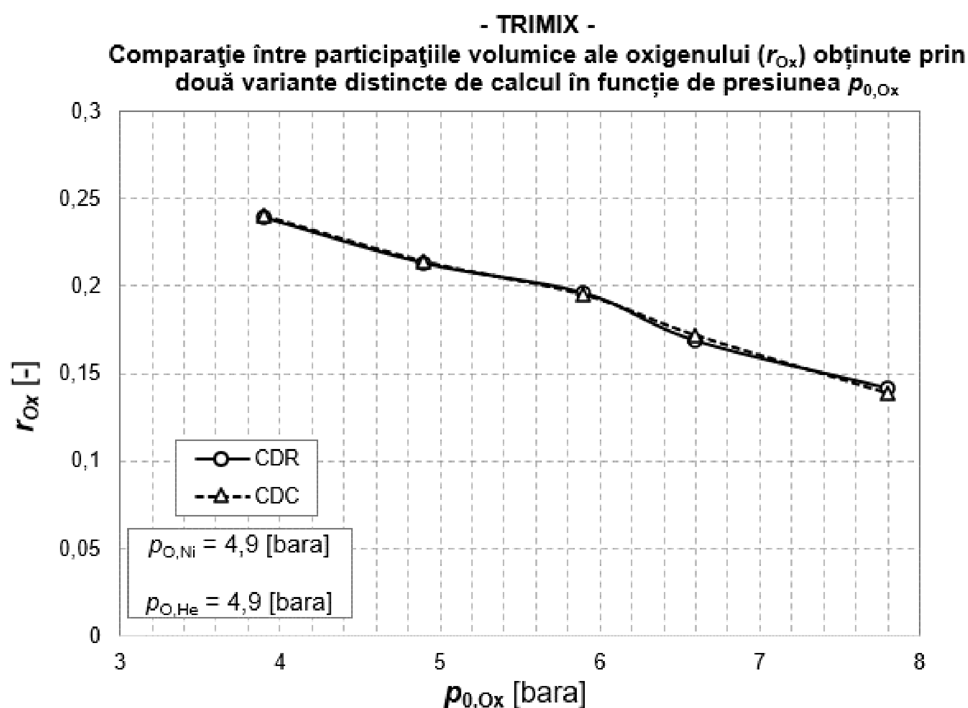
CDR – varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre; CDC - varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul.

Figura 8.28 Reprezentare comparativă a valorilor participației masice a heliului (m_{He}), obținute prin două variante de calcul, în funcție de presiunea $p_{0,He}$ pentru amestec respirator HELIOX

Diferențele dintre valorile obținute cu cele două variante de calcul folosite sunt: la presiunea de 2,9 bara diferența între cele două valori este de 5,80 %, la presiunea de 3,4 bara diferența între cele două valori este de 4,74 %, la presiunea de 3,9 bara diferența între cele două valori este de 0,40 %, la presiunea de 4,9 bara diferența între cele două valori este de 1,41 %, la presiunea de 5,8 bara diferența între cele două valori este de 0,62 %, la presiunea de 6,8 bara diferența între cele două valori este de 3,75 %. Pentru ultima valoare a presiunii și anume $p_{0,He}$ = 7,7 bara, nu există diferențe între valorile obținute.

8.5.14 Reprezentarea comparativă a valorilor participației volumice a oxigenului (r_{Ox}), în funcție de presiunea de alimentare a ajutajului de injecție, obținute prin două variante de calcul, pentru cele cinci teste de preparare a amestecurilor respiratorii TRIMIX

În figura 8.29 sunt prezentate, valorile participației volumice a oxigenului (r_{Ox}), ce corespund amestecului ternar TRIMIX, valori obținute prin aplicarea celor două variante de calcul (CDR și CDC).



CDR – varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre; CDC - varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul.

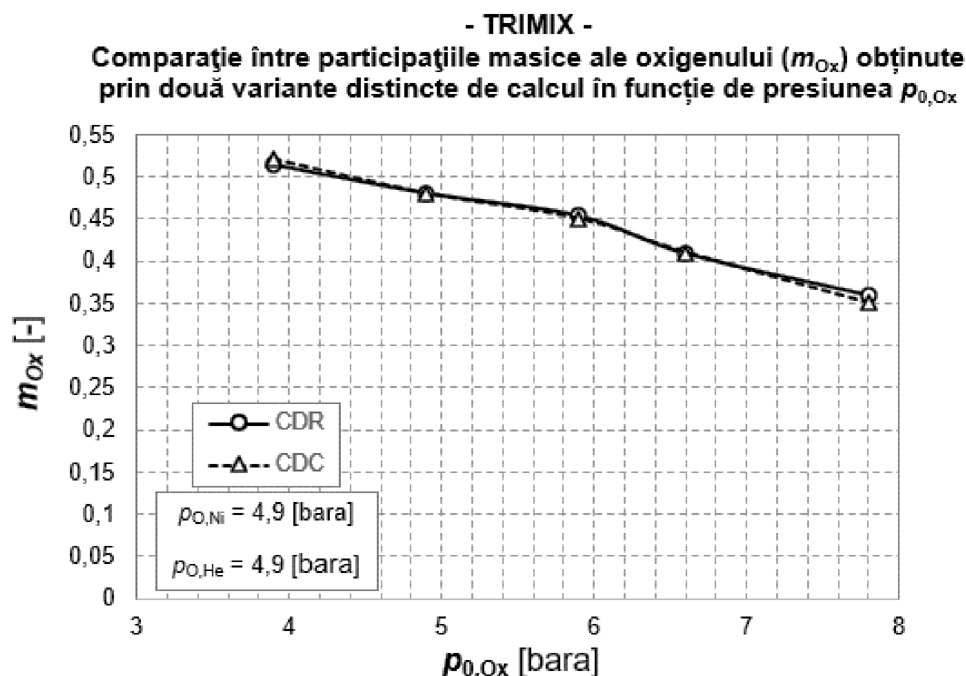
Figura 8.29 Reprezentare comparativă a valorilor participației volumice a oxigenului (r_{Ox}), obținute prin două variante de calcul, în funcție de presiunea $p_{0,Ox}$ pentru amestec respirator TRIMIX

Pentru ambele variante, calculele au fost făcute considerând diverse valori ale presiunii $p_{0,Ox}$, presiunile celorlalte două gaze din compoziția amestecului, $p_{0,Ni}$ și $p_{0,He}$, fiind menținute la valoarea constantă de 4,9 bara.

Diferențele dintre valorile obținute prin cele două variante de calcul pentru participația volumică a oxigenului (r_{Ox}), sunt: la presiunea $p_{0,Ox}$ = 3,9 bara diferența este de 0,42 %, la presiunea $p_{0,Ox}$ = 4,9 bara diferența este de 0,47 %, la presiunea $p_{0,Ox}$ = 5,9 bara diferența este de 0,51 %, la presiunea $p_{0,Ox}$ = 6,6 bara diferența este de 1,78 %, iar pentru $p_{0,Ox}$ = 7,8 bara diferența este de 2,11%.

8.5.15 Reprezentarea comparativă a valorilor participației masice a oxigenului (m_{Ox}), în funcție de presiunea de alimentare a ajutajului de injecție, obținute prin două variante de calcul, pentru cele cinci teste de preparare a amestecurilor respiratorii TRIMIX

În figura 8.30 sunt transpuse grafic valorile participației masice a oxigenului (m_{Ox}) rezultate în cazul amestecurilor TRIMIX studiate.



CDR – varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre; CDC - varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul.

Figura 8.30 Reprezentare comparativă a valorilor participației masice a oxigenului (m_{Ox}), obținute prin două variante de calcul, în funcție de presiunea p0,Ox pentru amestec respirator TRIMIX

Prin compararea valorilor lui m_{Ox} obținute prin varianta de calcul CDC cu valorile calculate cu varianta CDR, diferențele, exprimate procentual, sunt: la

presiunea $p_{0,Ox}$ = 3,9 bara diferența este de 0,97 %, : la presiunea $p_{0,Ox}$ = 4,9 bara diferența este de 0,21 %, la presiunea $p_{0,Ox}$ = 5,9 bara diferența este de 0,88 %, : la presiunea $p_{0,Ox}$ = 6,6 bara diferența este de 0,24 %, iar pentru $p_{0,Ox}$ = 7,8 bara diferența este de 2,51 %.

8.5.16 Reprezentarea comparativă a valorilor participației volumice ale componentelor din compoziția amestecurilor NITROX, HELIOX și TRIMIX studiate, obținute experimental cu valorile obținute prin calcul

Pentru a facilita compararea valorilor participațiilor volumice ale componentelor din compoziția celor trei tipuri de amestecuri respiratorii studiate (NITROX, HELIOX și TRIMIX) în cadrul fiecărui test experimental, valori obținute prin analiză, cu valorile obținute prin calcul pe baza debitelor masice, au fost întocmite tabele în care sunt prezentate sintetic valorile obținute prin analiza oxigenului din amestec folosind un analizor specializat și valorile calculate pe baza debitelor masice ale componentelor determinate cu rotametrele.

În tabelul 8.16 sunt date valorile participațiilor volumice ale componentelor ce constituie amestecul NITROX, valori ce au rezultat prin aplicarea celor două metode de determinare. Transpunerea grafică a acestor valori este prezentată în figura 8.31.

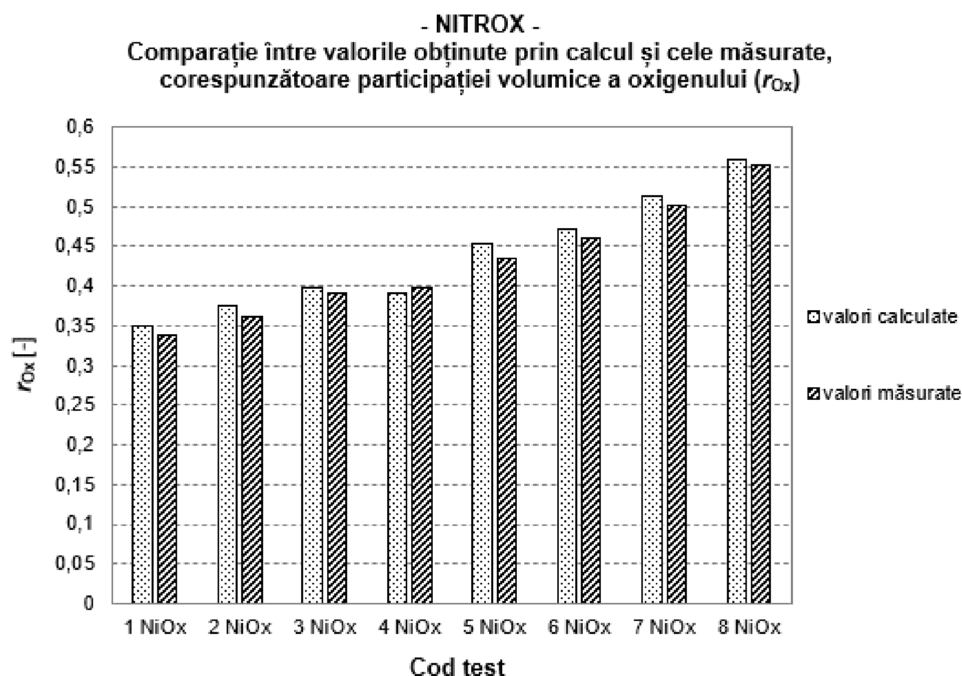


Figura 8.31 Reprezentare comparativă a valorilor participației volumice a oxigenului (r_{Ox}) obținute prin măsurare, în cadrul testelor experimentale cu cele obținute prin calcul, pentru cele opt teste de preparare a amestecului respirator NITROX

Comparând valorile participației volumice r_{Ox} obținute prin calcul cu cele măsurate rezultate prin analiza oxigenului din amestec, se remarcă următoarele diferențe: pentru testul 1 NiOx diferența este de 2,95 %, pentru testul 2 NiOx diferența este de 4,16 %, pentru testul 3 NiOx diferența este de 2,31 %, pentru testul 4 NiOx diferența este de 1,51 %, pentru testul 5 NiOx diferența este de 3,90 %, pentru testul 6 NiOx diferența este de 2,39 %, pentru testul 7 NiOx diferența este de 2,59 %, iar pentru testul 8 NiOx diferența este de 1,08 %.

Reprezentarea grafică, comparativă, a valorilor ce corespund participației volumice a azotului (r_{Ni}) se regăsește în figura 8.32.

Diferențele dintre valorile participației volumice, r_{Ni}, obținute prin calcul față de cele rezultate prin analiza oxigenului din amestec sunt următoarele: pentru testul 1 NiOx diferența este de 1,51 %, pentru testul 2 NiOx diferența este de 2,35 %, pentru testul 3 NiOx diferența este de 1,48 %, pentru testul 4 NiOx diferența este de 0,83 %, pentru testul 5 NiOx diferența este de 3,02 %, pentru testul 6 NiOx diferența este de 2,22 %, pentru testul 7 NiOx diferența este de 2,61 %, iar pentru testul 8 NiOx diferența este de 1,34 %.

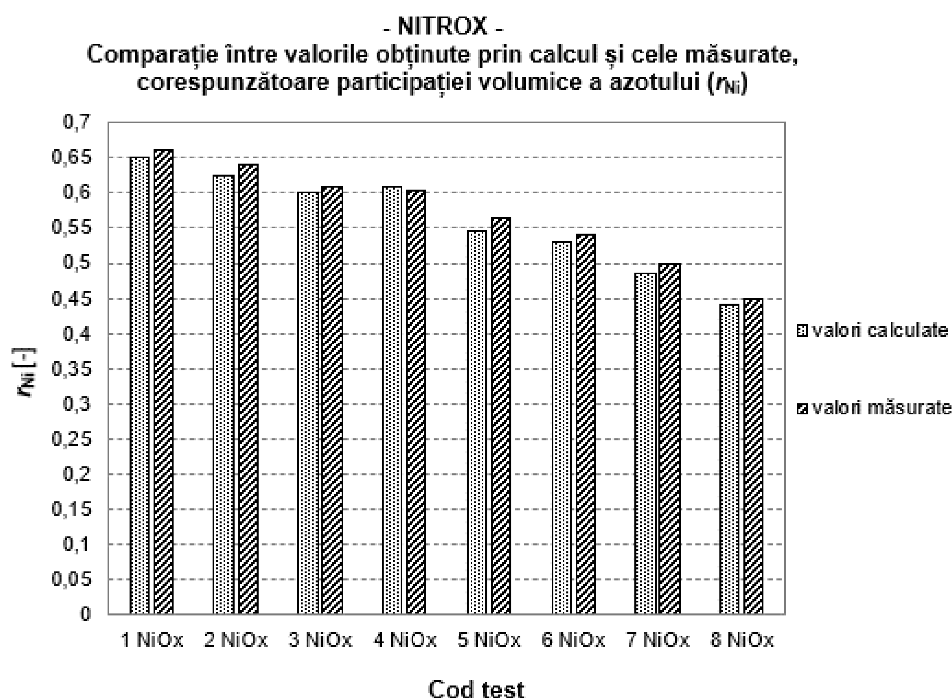


Figura 8.32 Reprezentare comparativă a valorilor participației volumice a azotului (r_{Ni}) obținute prin măsurare, în cadrul testelor experimentale cu cele obținute prin calcul, pentru cele opt teste de preparare a amestecului respirator NITROX

Pentru cele șapte amestecuri HELIOX preparate în cadrul studiilor efectuate, valorile participației volumice a celor două gaze (r_{Ox}, r_{He}), valori obținute pe baza măsurării cu analizoare a participației oxigenului din amestec și valorile obținute prin calcul, sunt prezentate în tabelul 8.17, iar transpunerea lor sub formă grafică este dată în figura 8.33 și respectiv în figura 8.34.

În figura 8.33 sunt prezentate grafic, comparativ, valorile participației volumice a oxigenului (r_{Ox}), valori obținute prin aplicarea celor două metode de determinare folosite (prin calcul și prin măsurare).

Tabelul 8.16 Amestecuri NITROX. Valorile participațiilor volumice ale componentelor (r_{Ox} și r_{Ni} mOxinjșimNiinj), obținute prin analiza oxigenului din amestec și valorile determinate prin calcul, pe baza debitelor masice ale componentelor

Cod test	**Valori măsurate cu analizorul de gaz**		**Valori calculate**	
	r_{Ox}	r_{Ni}	r_{Ox}	r_{Ni}
	[-]	[-]	[-]	[-]
1 NiOx	0,339	0,661	0,349	0,651
2 NiOx	0,361	0,639	0,376	0,624
3 NiOx	0,390	0,610	0,399	0,601
4 NiOx	0,398	0,603	0,392	0,608
5 NiOx	0,436	0,564	0,453	0,547
6 NiOx	0,460	0,541	0,471	0,529
7 NiOx	0,501	0,499	0,514	0,486
8 NiOx	0,552	0,448	0,558	0,442

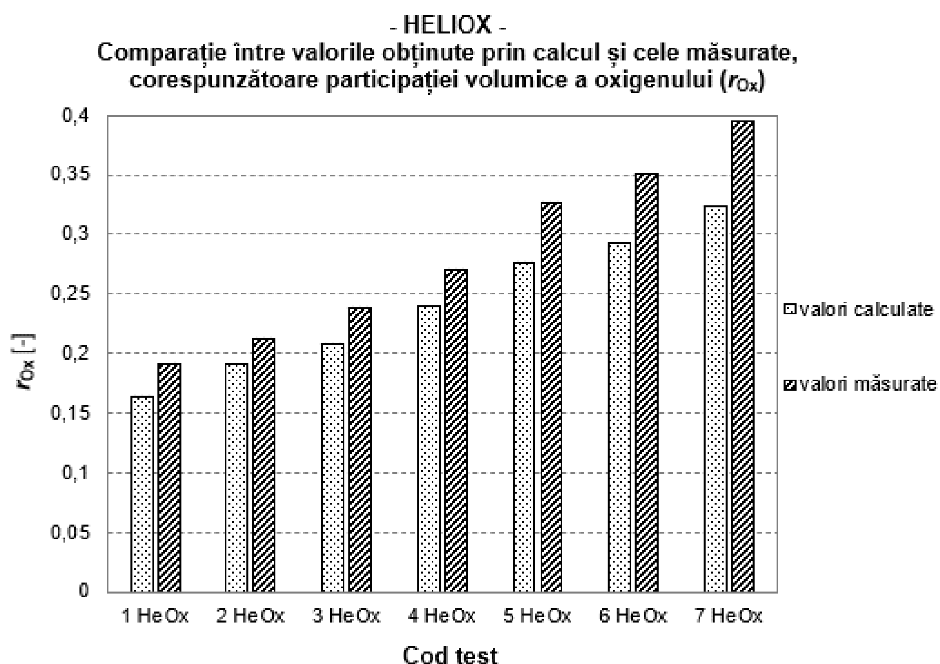


Figura 8.33 Reprezentare comparativă a valorilor participației volumice a oxigenului (r_{Ox}) obținute prin măsurare, în cadrul testelor experimentale cu cele obținute prin calcul, pentru cele șapte teste de preparare a amestecului respirator HELIOX

Diferențele rezultate în cazul valorilor obținute privind participația volumică a oxigenului (r_{Ox}) sunt: pentru testul 1 HeOx diferența este de 14,14

%, pentru testul 2 HeOx diferența este de 9,91 %, pentru testul 3 HeOx diferența este de 12,97 %, pentru testul 4 HeOx diferența este de 11,12 %, pentru testul 5 HeOx diferența este de 15,34 %, pentru testul 6 HeOx diferența este de 16,52 %, iar pentru testul 7 HeOx diferența este de 17,97 %.

În figura 8.34 sunt prezentate grafic, comparativ, valorile corespunzătoare participației volumice a heliului (r_{He}), valori obținute prin aplicarea celor două metode de determinare folosite (prin calcul și prin măsurare).

Pentru participația volumică a heliului (r_{He}) diferența între valorile obținute prin cele două metode de determinare folosite (calcul și măsurare) sunt: pentru testul 1 HeOx diferența este de 3,34 %, pentru testul 2 HeOx diferența este de 2,66 %, pentru testul 3 HeOx diferența este de 4,07 %, pentru testul 4 HeOx diferența este de 4,11 %, pentru testul 5 HeOx diferența este de 7,42 %, pentru testul 6 HeOx diferența este de 8,94 %, iar pentru testul 7 HeOx diferența este de 11,74 %.

Tabelul 8.17 Amestecuri HELIOX. Valorile participațiilor volumice ale componentelor (r_{Ox} și r_{He} mOxinjșimNiinj), obținute prin analiza oxigenului din amestec și valorile determinate prin calcul obținute pe baza debitelor masice ale componentelor

Cod test	**Valori măsurate cu analizorul de gaz**		**Valori calculate**	
	r_{Ox}	r_{He}	r_{Ox}	r_{He}
	[-]	[-]	[-]	[-]
1 HeOx	0,191	0,809	0,164	0,836
2 HeOx	0,212	0,788	0,191	0,809
3 HeOx	0,239	0,761	0,208	0,792
4 HeOx	0,27	0,73	0,24	0,76
5 HeOx	0,326	0,674	0,276	0,724
6 HeOx	0,351	0,649	0,293	0,707
7 HeOx	0,395	0,605	0,324	0,676

În cazul amestecurilor TRIMX studiate, valorile obținute pentru prticipația volumică a oxigenului (r_{Ox}) și valoarea cumulată a participației volumice a azotului și heliului ($r_{\mathrm{Ni+He}} = r_{\mathrm{Ni}} + r_{\mathrm{He}}$) sunt date în tabelul 8.18.

În figura 8.35 sunt prezentate grafic, comparativ, valorile calculate și măsurate obținute în cazul participației volumice a oxigenului (r_{Ox}).

Diferențele dintre valorile participației volumice a oxigenului (r_{Ox}) obținute prin cele două metode de determinare folosite (calcul și măsurare) sunt: pentru testul 1 TRI diferența este de 11,25 %, pentru testul 2 TRI diferența este de 10,58 %, pentru testul 3 TRI diferența este de 10,91 %, pentru testul 4 TRI diferența este de 13,41 %, iar pentru testul 5 TRI diferența este de 14,64 %.

În figura 8.36 sunt prezentate grafic, comparativ, valorile obținute în cazul valorilor cumulate a participațiilor volumice ale azotului (r_{Ni}) și heliului (r_{He}), gaze inerte din componența amestecului TRIMIX.

Tabelul 8.18 Amestecuri TRIMIX. Valorile participațiilor volumice ale componentelor (r_{Ox} și r_{Ni+He} mOxinjșimNiinj), obținute prin analiza oxigenului din amestec și valorile determinate prin calcul pe baza debitelor masice ale componentelor

Cod test	Valori măsurate cu analizoare de gaz		Valori calculate			
	r_{Ox}	$r_{Ni}+r_{He}$	r_{Ox}	r_{He}	r_{Ni}	$r_{Ni}+r_{He}$
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1 TRI	0,160	0,840	0,142	0,664	0,195	0,859
2 TRI	0,189	0,811	0,169	0,644	0,187	0,831
3 TRI	0,220	0,780	0,196	0,624	0,18	0,804
4 TRI	0,246	0,754	0,213	0,61	0,176	0,786
5 TRI	0,280	0,720	0,239	0,589	0,173	0,762

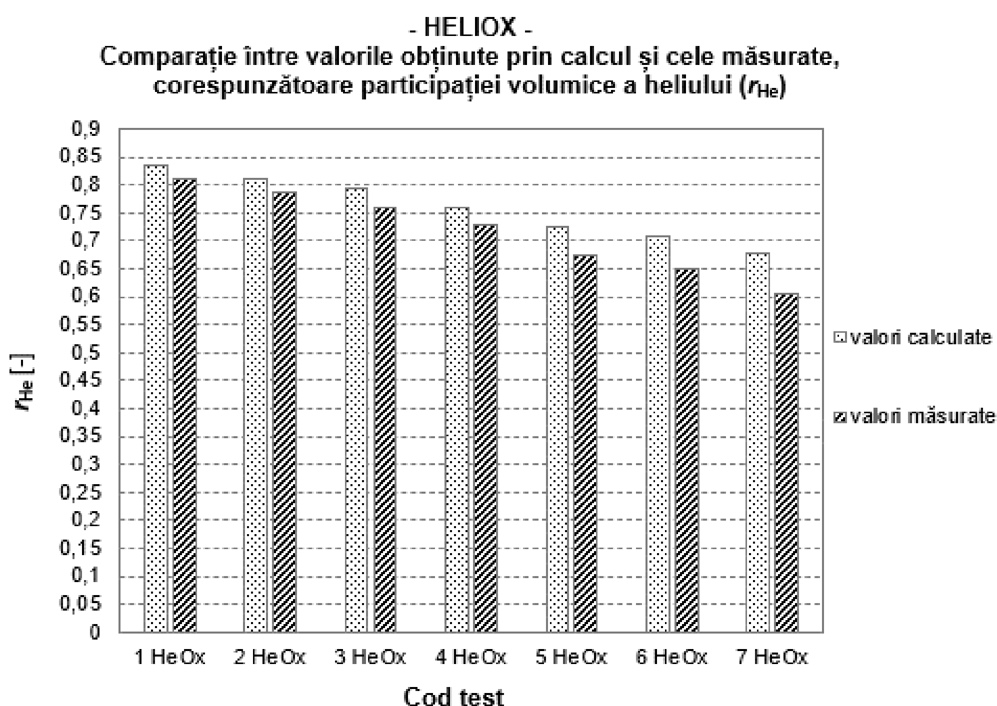


Figura 8.34 Reprezentare comparativă a valorilor participației volumice a heliului (r_{He}) obținute prin măsurare, în cadrul testelor experimentale cu cele obținute prin calcul, pentru cele șapte teste de preparare a amestecului respirator HELIOX

Între rezultatele obținute pentru participațiile volumice ale azotului (r_{Ni}) și heliului (r_{He}) stabilite ca valoare unică, cumulată, diferențele dintre valorile obținute prin calcul față de cele din măsurători sunt: pentru testul 1 TRI diferența este de 2,26 %, pentru testul 2 TRI diferența este de 2,47 %, pentru testul 3 TRI diferența este de 3,08 %, pentru testul 4 TRI diferența este de 4,24 %, iar pentru testul 5 TRI diferența este de 5,84 %.

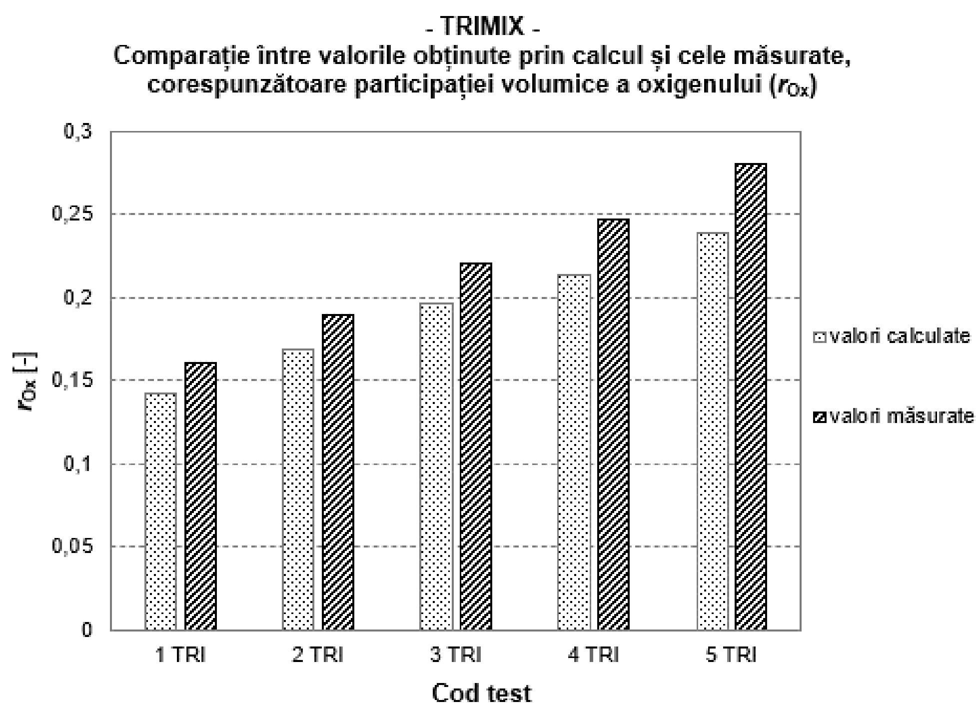


Figura 8.35 Reprezentare comparativă a valorilor participației volumice a oxigenului (r_{Ox}) obținute, prin măsurare, în cadrul testelor experimentale cu cele obținute prin calcul, pentru cele cinci teste de preparare a amestecului respirator TRIMIX

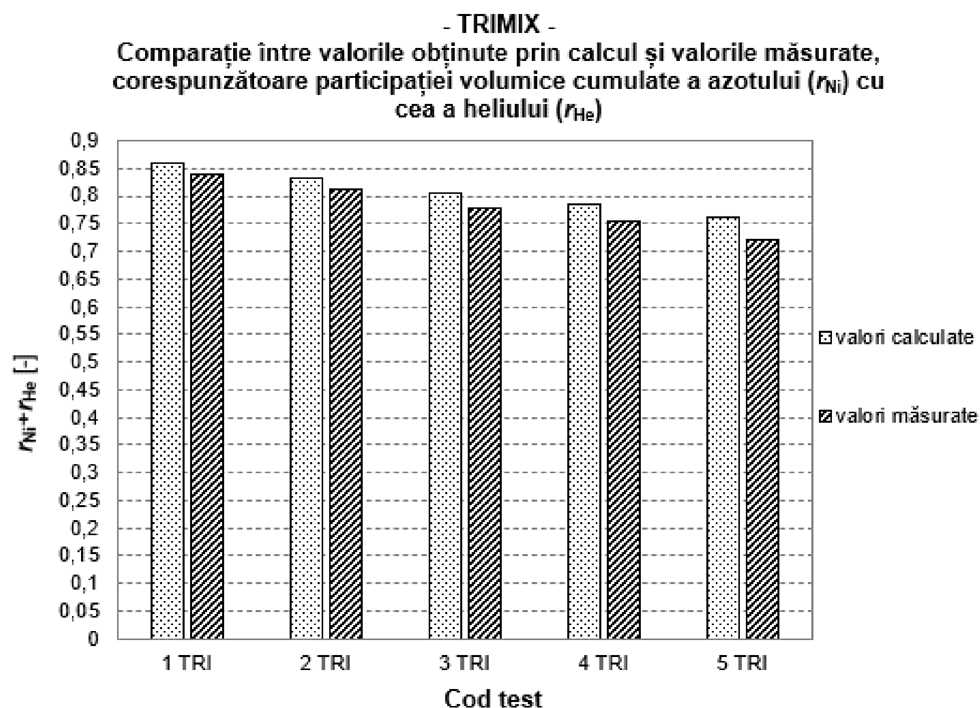


Figura 8.36 Reprezentare comparativă a valorilor cumulate a participațiilor volumice ale azotului (r_{Ni}) și heliului (r_{He}) obținute în cadrul testelor experimentale cu cele obținute prin calcul, pentru cele cinci teste de preparare a amestecului respirator TRIMIX

BIBLIOGRAFIE

1 ALBU C-tin. D., BREZEANU M. - *Mică enciclopedie de chimie*. Editura Enciclopedică Română, București 1974

2 BADIU, G., ILIESCU, C., PETRU, A. - *Dynamic study of postural tremor in high pressure conditions*. Roumanian Journal of Physiology, Vol. 28, nr. 3-4, pp. 83-87, București, 1991

3 BENNETT, P.B. - *Atlantis III, an experimental deep dive to 686 m using TRIMIX 10*. Medicine Subaquatique et Hyperbare, vol. XX, nr. 80, pp. 320-322, 1981

4 BERRY, Y., GAVARRY, P., HUBERT, J.P., LE CHUITON, J., PARC, J. - *La plongée et l'intervention sous la mer*. Ed. Arthaud, Paris, 1977

5 BRUCE R., WIENKE AND TIMOTHY R., O'Leary - *Mixed Gas Decompression Theory with Algorithms and Statistics*. RGBM Technical Series 6 NAUI Technical Diving Operations Tampa, Florida 33619

6 BÜHLMANN, A.A. - *Untersuchungen zur Dekompresssion bei enniedrigtem Luftdruck*. Schweizerische Medizinische Wochenschrift, nr. 114, 1984

7 BÜHLMANN, A.A. - *Decompression. Decompression sickness*. Springer Verlag, pp. 4-62, Berlin, 1984

8 DAVIS, R.H. - *Deep diving and submarine operations*. The Saint Catherine Press, London, 1938

9 DEGERATU, M., PETRU, A., GEORGESCU, Şt. - *Aparate de respirat sub apă*. Editura Matrix Rom, ISBN 973-685-558-9, București, 2003

10 DEGERATU, M. - *Analiza teoretică a curgerii gazelor prin ajutaje și conceperea unui stand experimental de preparare a amestecurilor de gaze în flux continuu*. Raport tehnic la C. C. Nr.A3312/11.09.2014, Contract UTCB Nr. 208/2014, București, 2014

11 DEGERATU, M. - *Calculul termohidraulic al circuitelor aferente echipamentelor de scufundare ASMAR-AMOX*. Catedra de Hidraulică și Protecția Mediului, Raport tehnic la C.C. nr. 108/1991, I.C.B., București, 1991

12 DEGERATU, M. - *Modelarea matematică a fenomenelor gazodinamice specifice unui sistem cu injecție la debit masic constant pentru amestecuri respiratorii binare.* A II-a Sesiune de Comunicări științifice cu tema Inginerie, tehnologie și medicină subacvatică, Centrul de Scafandri, Constanța, 1988

13 DEGERATU, M. - *Simularea teoretică a funcționării aparatului de scufundare ASMA cu amestec Heliu-Oxigen*. A IV-a Sesiune de Comunicări Științifice cu tema Inginerie, tehnologie și medicină subacvatică, Centrul de Scafandri, Constanța, 1989

14 DEGERATU, M. - *Modelarea matematică a proceselor gazodinamice din cadrul aparatelor de scufundare utilizând oxigen pur și amestec binar*. Catedra de Hidraulică, Raport tehnic la C.C. nr. 73/1989, I.C.B., București, 1989

15 DEGERATU, M. - *Studii de optimizare a activităților de scufundare prin utilizarea amestecurilor de gaze și a tabelelor de decompresie tip NITROX*. Raport tehnic la C. C. Poziția 124 din Planul sectorial de cercetare-dezvoltare al Ministerului Apărării Naționale, București, 2013

16 DEGERATU, M. - *Studiu privind gazodinamica unui dispozitiv cu injecție masică constantă pentru amestecuri binare.* Catedra de Hidraulică, Raport tehnic la C.C. nr. 45/1986, I.C.B., București, 1986

17 DEGERATU, M., PETRU A., GEORGESCU, Şt., ALBOIU N. (2006) - *Expunerea la presiune și decompresia scafandrilor militari*. Revista Tehnica Militară, Nr.1, pp.40-45, ISSN 1582-7321, Departamentul pentru Armamente, Direcția Cercetare- Dezvoltare, București

18 DEGERATU, M., PETRU A., GEORGESCU, Şt., ALBOIU N. (2006) - *Procesele respirației la scafandri militari. Respirația în hiperbarism*. Revista Tehnica Militară Nr. 2/ 2006, pp. 56 - 71 ISSN 1582-7321, Departamentul pentru Armamente, Direcția Cercetare- Dezvoltare, București

19 DEGERATU, M., PETRU A., GEORGESCU, Şt., ALBOIU N. (2005) - *Gaze și amestecuri de gaze utilizate în scufundarea militară*. Revista Tehnica Militară, Nr.4, pp.38-48, ISSN 1582-7321, Departamentul pentru Armamente, Direcția Cercetare- Dezvoltare, București

20 DEGERATU, M., PETRU, A., BEIU, V. - *Computer-aided Simulation of Theoretical Processes in Binary and Ternary Mixtures of Hyperbaric Systems Used in Deep Diving*. Chemical Abstracts, page 346, 9-Biochem. Methods, vol. 107, Columbus, Ohio, U.S.A., 1986

21] DEGERATU, M., PETRU, A., GEORGESCU, Șt., IONIȚĂ, S. - *Tehnologii hiperbare pentru scufundări unitare și în saturație*. Ed. Matrix Rom, ISBN 978-973-755-260-0, București, 2008

22 DEGERATU, M., PETRU, A., IONIȚĂ, S. - *Manualul scafandrului*. Editura "Per Omnes Artes", ISBN 973-97916-5-4, București, 1999

[23] DINU, D., VLAD, C. - *Scafandri și vehicule subacvatice.* Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1986

[24] FRUCTUS, X. - *HYDRA V: un succes au-dela des previsions*. Rev. Oceans nr. 144, pp. 46-48, 1985

[25] FRUCTUS, X., SCIARLI, R.L. - *La plongée santé et sécurité.* Editions Maritimes et d'Outre-Mer, Paris, 1980

[26] GARDETTE, B. - *HYDRA IV and HYDRA V, human deep hydrogen dives 1983-1985*. In hydrogen as a diving gas. 33-rd Under sea and Hyperbare Medical Society Workshop. Ed. BRAUER R. W., 1987

[27] GRANEFF, S. - *L'homme et la mer*. Ed. Press de la Cité, Paris, 1975

[28] HAUX, G. - *Subsea manned engineering.* Bailliere Tindall, London, 1982

[29] HAUX, G. – *Tauchtechnik*. Band I. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1969

[30] HEMPLEMAN, H.V., GARRARD, J.T., HARRIS, D.J., HAYES, P.A., HENNESSY, T.Y., NICHOLS, G., TOROK, Z., WINSBOROUGH, M.N. - *U.K. deep diving trials*. Phil. Trans. R. Soc. London, B304, pp. 119-141, London, 1984

[31] IAMANDI, C., DEGERATU, M. - *Studiu teoretic privind circuitul de injecție a amestecului gazos aferent echipamentului de scufundare tip ASMA*. Sesiune de Comunicări Științifice cu tema „Contribuții românești în ingineria și tehnologia activităților subacvatice", Centrul de Scafandri, Constanța, 1987

[32] KIREEV V. A. - *Chimie fizică*. Editura Tehnică, București 1962

[33] LAMBERTSEN, C.J. - *Effects of Excessive Pressure of Oxygen, Nitrogen, Helium, Carbon Dioxide and Carbon Monoxide*. Medical Physiology. Ed. V.B. Mountcastle, vol. II, 1980

[34] LARN, R., WHISTLER, R. - *Commercial diving manual*. Ed. Davis & Charles, 1984

[35] LEMAIRE, C. - *Utilisation de l'oxygène en plongée*. C.E.H. COMEX, Marseille, 1977

[36] LOMAX H. - *The Commercial Diver's Handbook: Surface-Supplied Diving, Decompression and Chamber Operations Field Guide*. Best Publishing Company 2013 ISBN 978-1930536-71-5

[36] LUBITZSCH, W. - *Aspekte der modernen Tauchgeräte-technik*. Drägerheft, nr. 301, Lübeck, 1975

[37] MARTIN, R.C. - *The deep-sea diver yesterday, today and tomorrow*. Cornell Maritime Press, Cambridge, Maryland, 1978

[38] NĂSTĂSESCU, GH. - *Omul sub apă și la altitudine*. Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1980

[38] NEGOIU D. - *Tratat de chimie anorganică – Chimie generală*; Editura Tehnică, București 1972

[39] PASTUCH, C.O. - *Testarea solicitării funcției respiratorii și circulatorii în cursul adaptării și muncii în mediul hiperbar.* Teză de doctorat, Institutul de Medicină și Farmacie Cluj-Napoca, 1987

[40] PENZIAS, W., GOODMAN, M.V. - *Man Beneath the Sea - A Review of Underwater Ocean Engineering*. Ed. Wiley-Interscience, New York, 1973

[41] PETRU, A. - *Aparate autonome de respirat sub apă*. Buletinul Marinei Militare, nr. 2, Constanța, 1985

[42] PETRU, A., BEIU, V., DEGERATU, M. - *Studiu privind optimizarea rezervei de gaz pentru creșterea autonomiei în scufundare.* A II-a Sesiune de Comunicări Științifice cu tema "Inginerie, tehnologie și medicină subacvatică", Centrul de Scafandri, Constanța, 1985

[43] PETRU, A. - *Amestecuri respiratorii*. Buletinul Tehnica Militară, nr. 3-4, București, 1987

[44] PETRU, A. - *Aparate de respirat sub apă cu circuit semiînchis*. Buletinul Tehnica Militară, nr. 4, București, 1989

[45] PETRU, A., DEGERATU, M., IONIȚĂ, S. - *Seria Tehnologii hiperbare: Ghidul scafandrului autonom*. Editura Olimp-Press, Bucureşti,1992

[46] PETRU A. - *Hidraulica proceselor hiperbare*. Teză de doctorat Universitatea tehnică de Construcții București 1993

[47] PETRU, A., DEGERATU, M. - *Amestecuri respiratorii de gaze și utilizarea lor în scufundare*. Ministerul Apărării Naționale, Ed. Comandamentului Marinei Militare, Constanța, 1993

[48] PETRU, A., DEGERATU, M. - *Echipamente pentru pătrunderea omului sub apă*. Ministerul Apărării Naționale, Ed. Comandamentului Marinei Militare, Constanța, 1994

[49] PETRU, A., DEGERATU, M. - *Tehnologii de scufundare.* Ministerul Apărării Naționale, Ed. Comandamentului Marinei Militare, Constanța, 1994

[50] POULET, G., BARINCOU, R. - *La plongée*. Ed. Denöel, Paris, 1988

[51] Somers Lee H., Nemiroff Martin J, - *Hyperbaric Chamber Attendant's Handbook.* The University of Michigan, 1978, MICHU-SG-79-603

[52] ŞANDRU E., BIANCHI A.M., MIHĂILĂ C., CALUIANU V., ANTONESCU N. - *Termotehnică și aparate termice*. Editura Didactică și Pedagogică, București 1982

[53] VANN, R.D. - *Decompression theory and applications*. The Physiology and Medicine of Diving. 3-th edition. Ed. P.B. BENNETT & D.H. ELLIOT, pp. 353-380, London, 1982

[54] VLAD, C., DINU, D. - *Intervenții subacvatice*. Editura Tehnică, București, 1982

[55] WILLIAMS, S. - *Underwater Breathing Apparatus. The Physiology and Medicine of Diving and Compressed Air Work*, Ed. P.B. Bennett & Elliot D.H. Bailliere Tindal and Cassell, London, 1969

[56] WORKMAN, R.D. - *Calculation of decompression schedule for nitrogen-oxigen and helium-oxygen dives*. Report 6-65 US Navy Experimental Diving Unit, Washington D.C., 1965

[57] *Modelarea matematică și testarea experimentală a proceselor gazodinamice aferente instalațiilor de preparare în flux continuu a amestecurilor de gaze binare și ternare utilizate în scufundarea profesională*. Contract nr. A 3794/26.08.2015 Centrul de Scafandri Constanța, Forțele Navale Române. Planul sectorial de cercetare-dezvoltare al Ministerului Apărării Naționale pentru anul 2015 (nr. UTCB 160/2015)

[56] *Elaborarea bazei teoretice aferente modelarii matematice a proceselor hiperbare si conceperea unei instalații pentru testări experimentale*. Contract Nr. A3313/11.09.2015, Contract UTCB Nr. 209/2015 din cadrul temei “Simularea teoretică și validarea experimentală a proceselor cu amestecuri de gaze din barocamerele aferente sistemelor de scufundare unitară și în saturație”, din Planul Sectorial pentru anul 2015 al MApN, faza: “Elaborare studiu tehnic - modelarea matematică a proceselor hiperbare”. Beneficiar: Centrul 39 Scafandri Constanța, Forțele Navale Române

[59] *Analiza teoretică a curgerii gazelor prin ajutaje și conceperea unui stand experimental de preparare a amestecurilor de gaze în flux continuu*. Contract Nr.A3312/11.09.2014, Contract UTCB Nr. 208/2015 din cadrul temei “Modelarea matematică și testarea experimentală a proceselor gazodinamice aferente instalațiilor de preparare în flux continuu a amestecurilor de gaze binare și ternare utilizate în scufundarea profesională”, din Planul Sectorial pentru anul 2015 al MApN, faza: “Elaborare studiu tehnic privind modelarea matematică a proceselor gazodinamice”. Beneficiar: Centrul 39 Scafandri Constanța, Forțele Navale Române

[60] *Realizare instalație experimentală de preparare în flux continuu a amestecurilor respiratorii. Realizare în flux continuu de amestecuri respiratorii binare și ternare din cadrul temei “Modelarea matematică și testarea experimentală a proceselor gazodinamice aferente instalațiilor de preparare în flux continuu a amestecurilor de gaze binare și ternare utilizate în scufundarea profesională”*. Contract nr. 247/2016 (A 5119/28.09.2016). Beneficiar Ministerul Apărării Naționale – Forțele Navale Române, Centrul 39 Scafandri Constanța

[61] *Modelarea proceselor hiperbare aferente scufundărilor de sistem*. din Planul intern al Centrului de Scafandri Constanța, UM 02145 Constanța. Contract nr. 267/2016 Centrul de Scafandri Constanța, Forțele Navale Române. Tema TS267.0. UM02145. Planul sectorial de cercetare-dezvoltare al Ministerului Apărării Naționale pentru anul 2016

[62] *Modelarea matematică și testarea experimentală a proceselor gazodinamice aferente instalațiilor de preparare în flux continuu a amestecurilor de gaze binare și ternare utilizate în scufundarea profesională – Întocmire plan de testare evaluare. Testare evaluare a amestecurilor respiratorii obținute cu instalația experimentală. Validare experimentală a modelelor matematice concepute.* (Contract A 5233/08.08.2017). Planul sectorial de cercetare-dezvoltare al Ministerului Apărării Naționale pentru anul 2017. Beneficiar Ministerul Apărării Naționale – Forțele Navale Române, Centrul 39 Scafandri Constanța

[63] * * * - *The NOAA Diving Manual-Diving for Science and Technology*. U.S. Government Printing Office, Washington, 1975

[64] * * * - *U.S. Navy Diving Manual*. U. S. Government Printing Office, Washington, 1975

[65] * * * - *Norme privind organizarea și desfășurarea activităților de scufundare*. Centrul de Scafandri Constanța, Comandamentul Marinei Militare, MApN, Constanța, 1990

[66] * * * - *U.S. Navy Diving Manual*; SUPERSEDES SS521-AG-PRO-010, REVISION 5, August 2005

[67] * * * - The National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), NOAA *Diving Manual* U.S. Department of Commerce and Best Publishing Company 2011

[68] * * * - GHM Messtechnik - *Produktinformationen Durchflussmesser GRV – 150 GK*

[69] * * * - *Linde Gasekatalog*. Linde AG, Werksgruppe Technische Gase, München

[70] * * * - arhiva fotografică prof. dr. ing. Mircea Degeratu

[71] http://www.nitroxmadeeasy.com/Methods.htm

[72] http://www.boydski.com/diving/gear/compressor/mixing_stick.htm

[73] http://www.amigosdivecenter.com/stick.html

[74] http://www-personal.umich.edu/~lpt/mixhistory.htm - *Diving with Gas Mixes Other Than Air* by Larry "Harris" Taylor, Ph:D.

[75] http://www.techdiver.ws/trimix_eng.shtml

[76] http://www.seasubsea.com/airquality/*Air Quality Requirement for Nitrox Blending*